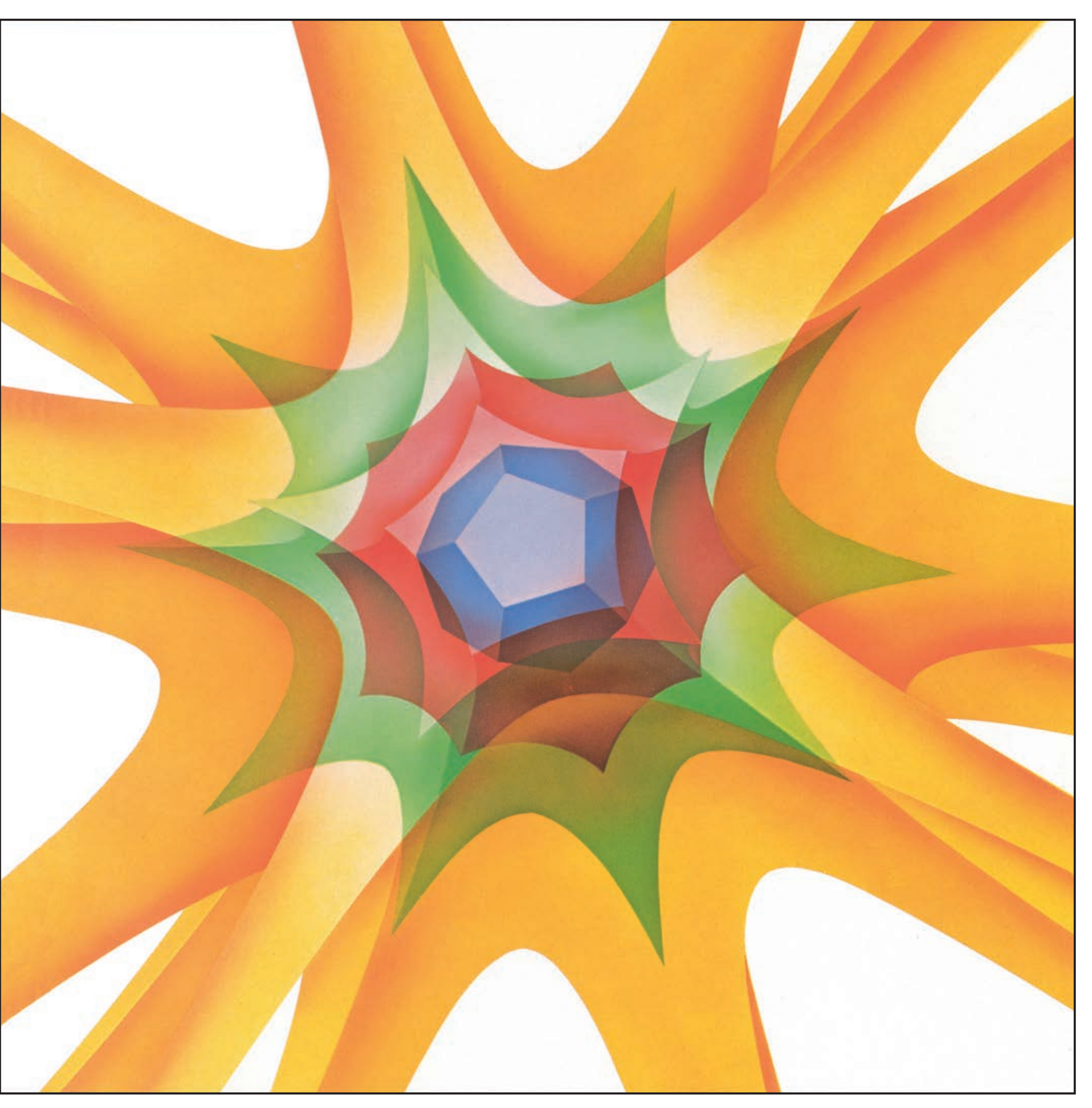
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



VARIEDADES MATEMATICAS

Septiembre 1984

350 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 96
Septiembre 1984

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA: Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029-Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

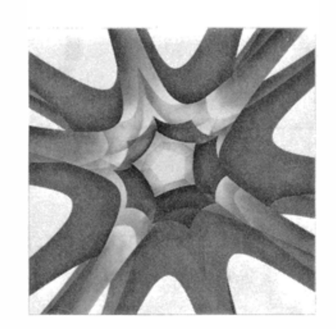
Montserrat Domingo: *Volcanes submarinos*; Santiago Torres: *Inmunotoxinas*; Joandomènec Ros: *Forma y función en la locomoción de los peces*; Manuel Puigcerver: *Estrellas simbióticas*; Luis Bou: *Tratamiento de textos plurilingües* y *Juegos de ordenador*; Francisco J. Carreras: *Matemática de las variables tridimensionales*; Heliodoro Ruipérez: *Raíces medievales de la revolución industrial*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Francisco Amat y Ramón Pascual

Libros:

José M. Sánchez-Ron, L. Villena, J. Ventura, R. Margalef y L. Alonso



LA PORTADA

El dibujo de la portada ilustra un método empleado en el estudio de las propiedades de los objetos matemáticos conocidos como trivariedades (véase "Matemática de las variedades tridimensionales", por William P. Thurston y Jeffrey R. Weeks, en este mismo número). Se genera una variedad tridimensional partiendo de un poliedro e identificando matemáticamente los puntos de su superficie unos con otros. Si se "pegan" o identifican matemáticamente las caras de un dodecaedro, la variedad resultante se llama espacio de Seifert-Weber. El estudio de esta variedad se simplifica si la deformamos hasta que la curvatura sea constante. Para el espacio de Seifert-Weber, la deformación se lleva a cabo dilatando el dodecaedro en un espacio "curvado" llamado espacio hiperbólico; cuanto más se dilata, más agudos se hacen los ángulos del dodecaedro. Se ofrece cuatro estadios del proceso de dilatación. El dodecaedro hiperbólico en rojo conduce a la versión geométricamente simple del espacio de Seifert-Weber.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029-Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - 08010-Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029-Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030-Madrid
Teléfono 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - 08034-Barcelona
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken, Walken Graphics

Página	Fuente
7-9	M. L. Salgado-Labouriau
10-11	Ricardo Génova y M. L. Salgado-Labouriau
12	M. L. Salgado-Labouriau
13-16	Ricardo Génova y M. L. Salgado-Labouriau
18-21	Andrew Tomko
22-23	Roger Hékinian, Centre Océanologique de Bretagne
24	Ian Worpole
25-26	Roger Hékinian, Centre Océanologique de Bretagne
27	Roger C. Searle, Institute of Oceanographic Sciences, Wormley, England
28	Roger Hékinian
31	Arthur E. Frankel, Cetus Corporation
32-38	Bunji Tagawa
41	Francisco Amat
47-56	Patricia J. Wynne
59	Observatorio Lick (*arriba*); Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (*abajo*)
60-61	George V. Kelvin
62	Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (*arriba*); George V. Kelvin (*abajo*)
63-70	George V. Kelvin
73	Joseph D. Becker
74	Paul Prosise
75-82	Edward Bell
85-97	Ian Worpole
99	Terry S. Reynolds, Universidad Politécnica de Michigan
100	Alan D. Iselin
101-102	Alan D. Iselin (*arriba*); Terry S. Reynolds, Universidad Politécnica de Michigan (*abajo*)
103	Fundaciones Astor, Lenox y Tilden, Biblioteca Pública de Nueva York
104-106	Terry S. Reynolds, Universidad Politécnica de Michigan
109-113	Ilil Arbel
117-121	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - 08005-Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013-Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

MARIA LEA SALGADO-LABOURIAU ("Reconstrucción del ambiente a través de los granos de polen") es investigadora en el centro de ecología del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC). Nació en Río de Janeiro y estudió biología en la Universidad de Minas Gerais, Brasil. Tiene la maestría y el doctorado en ciencias por la Universidad de Sao Paulo. Trabajó de 1960 a 1970 en el Instituto de Botánica de Sao Paulo, donde desarrolló estudios sobre la morfología del polen de plantas de las sabanas brasileñas. Profesó luego en la Universidad de Brasilia. En 1974 se trasladó a Venezuela, donde empezó a trabajar en el IVIC. Desde 1975 se ha dedicado principalmente al análisis de polen en sedimentos del Cuaternario tardío con el objeto de estudiar la paleoecología de las regiones tropicales de América del Sur.

ROGER HEKINIAN ("Volcanes submarinos") es geólogo marino del departamento de geología, geofísica y geoquímica del Centro Oceanológico de Bretaña (CNEXO) en Brest. Cursó estudios en la Universidad de Pisa, marchando luego a Estados Unidos para proseguir su formación. Aprendió oceanografía en el Observatorio Geológico Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia, por el que se licenció en 1966. Se doctoró por la Universidad estatal de Nueva York en Binghamton. Hékinian ha participado en proyectos de equipos de investigación franceses y estadounidenses.

R. JOHN COLLIER y DONALD A. KAPLAN ("Inmunotoxinas"), microbiólogo y genético molecular, respectivamente, realizaron gran parte del trabajo presentado en este artículo cuando se hallaban en la Universidad de California en Los Angeles (UCLA). Collier comenzó su carrera universitaria en Rice, doctorándose en biología por Harvard. "Estoy en el departamento de microbiología de UCLA desde 1966, nos cuenta. Mi carrera científica se ha centrado en el estudio de las estructuras y formas de acción de las toxinas bacterianas, en particular la de la difteria, toxina de *Pseudomonas* y la del cólera. Ya iniciados los trabajos con inmunotoxinas, Donald Kaplan, al que conocía desde hace tiempo en UCLA, se unió a mi grupo, dirigiendo un proyecto cuyo objetivo era clonar y secuenciar el gen de la toxina de la difteria. Finalizado el proyecto, Kaplan se trasladó a la Cetus Corporation. Mi grupo ha proseguido los estudios de las relaciones entre estructura y actividad de las proteínas tóxicas". Kaplan se licenció y doctoró en biología por UCLA. Trabajó en genética molecular en el departamento de microbiología de UCLA, incorporándose en 1981 a Cetus como jefe del proyecto de inmunotoxinas. A principios de este año le contrató la Dow Chemical Company.

PAUL W. WEBB ("Forma y función en la locomoción de los peces") es profesor de recursos naturales de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Nacido en el Reino Unido, se educó en la Universidad de Bristol, donde se licenció en ciencias, en 1967, y doctoró en zoología, en 1971. Se trasladó al Canadá con una beca del Consejo Nacional Canadiense de Investigación, que le permitió trabajar en la Estación Biológica del Pacífico de la Junta de Investigación en Pesquerías en Nanaimo, Columbia Británica. En 1972 se incorporó al claustro de la Facultad de Recursos Naturales, de Michigan, en la que ha permanecido casi ininterrumpidamente.

MINAS KAFATOS y ANDREW G. MICHALITSIANOS ("Estrellas simbióticas") son astrofísicos que comparten su interés por el tema de su artículo. Kafatos es profesor de física de la Universidad George Mason de Virginia. Licenciado en 1967 por la Universidad Cornell, se doctoró en física por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Trabajó luego, durante varios años, en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), volviendo más tarde a la George Mason. Michalitsianos es jefe de la sección de observatorios del Laboratorio de Astronomía y Física Solar del Centro de Vuelos Espaciales Goddard. Obtuvo su licenciatura en la Universidad de Arizona en Tucson, recibiéndose de doctor en astrofísica por la de Cambridge, en 1973. Tras una estancia como becario en astrofísica en el Instituto de Tecnología de California, ingresó en el Centro Goddard.

JOSEPH D. BECKER ("Tratamiento de textos plurilingües") escribe: "En la actualidad soy director de desarrollo internacional avanzado de la División de Ofimática de Xerox en Palo Alto, California. Obtuve en 1966 mi primer título universitario, por el MIT, y el doctorado en ciencias de cómputo por Stanford, en 1970. Hasta 1975 trabajé en Bolt, Beranek & Newman, Inc., sobre redes semánticas y robots inteligentes. Viajé después alrededor del mundo, deteniéndome durante algunos meses en Taiwán para estudiar chino. En 1976 ingresé en el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto, para colaborar en el diseño del ordenador Fuji-Xerox '8012-J Star' de lengua japonesa. Permanecí dos años en Tokio, para sondear la aceptación del J-Star. De vuelta a los Estados Unidos ayudé a integrar en el sistema Star el árabe, chino, coreano, ruso y otros idiomas."

WILLIAM P. THURSTON y JEFFREY R. WEEKS ("Matemática de las variedades tridimensionales") han colaborado en trabajos sobre el tema de su artículo en la Universidad de Princeton bajo la dirección del primero. Thurston es profesor de matemáticas en Princeton. Se licenció por el New College de Sarasota, Florida, en 1967, con la primera promoción de ese centro. Después de obtener el grado de doctor por la Universidad de California en Berkeley pasó un año en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton y otro en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, incorporándose luego a su cargo actual. Durante varios años ha trabajado en la teoría de foliaciones. También ha investigado sobre homeomorfismos de superficies, dedicándose luego al estudio de las variedades tridimensionales. Weeks es profesor auxiliar de matemáticas del Stockton State College de New Jersey. "Cursé matemáticas en Dartmouth y Princeton, escribe, y pronto me distrajo el gusto por la enseñanza. He pasado los últimos años desarrollando métodos de enseñar variedades matemáticas a los no especialistas. Espero terminar mi tesis doctoral el año que viene para dedicarme de nuevo a la docencia."

TERRY S. REYNOLDS ("Raíces medievales de la revolución industrial") es profesor de ciencia, tecnología y sociedad y director del programa sobre esa materia de la Universidad Politécnica de Michigan. Se recibió de doctor en historia de la ciencia por la Universidad de Kansas, en 1973. Enseñó en la Universidad de Wisconsin en Madison durante 10 años antes de ocupar su puesto actual.

Hace...

José M.ª López Piñero

... *trescientos cincuenta años*

Nació, en Sanlúcar de Barrameda, Antonio Hugo de Omerique, la figura matemática de mayor relieve en la España de finales del siglo XVII.

Son muy escasas las noticias existentes acerca de su biografía. Al parecer, creció en el seno de una familia de comerciantes y, aunque desconocemos las instituciones en las que se formó, consta su estrecha conexión con los jesuitas. El P. Manuel Jacobo Kresa, sucesor de José de Zaragoza en la cátedra de matemáticas del Colegio Imperial, de Madrid, habla de él en términos muy elogiosos en su edición de los *Elementos de Euclides* (1689), afirmando que, en aquel "siglo de cultísimos ingenios, esperaba de él la Geometría su mayor pulimento, en el cual tenía resueltos los más difíciles problemas que habían ejercitado los ingenios de los pasados geómetras; y que sus trabajos verían pronto la luz". En la fecha de aparición de su *Analysis* (1698), Omerique residía en Cádiz, seguramente desde hacía bastantes años. Anteriormente había vivido en Madrid, donde estuvo en relación con el príncipe italiano Rogelio Ventimiglia –del que cita algunos problemas en su obra– y sin duda también con el P. Kresa. En Cádiz fue amigo o discípulo del P. Powell, profesor de matemáticas del colegio que allí tenían los jesuitas, ya que en *Analysis* reproduce un breve texto suyo titulado *Algorithmus rationum.*

Aunque escribió un tratado de aritmética y otro de trigonometría, Omerique no llegó a publicar más que unas *Tablas artificiales* (1691) para calcular el valor de las barras de plata y su obra fundamental, que llamó *Analysis geometrica* (1698). Planeada en dos partes, solamente apareció la primera, a pesar de lo cual es uno de los títulos más importantes de la literatura científica española de este período. Algunos autores de mentalidad panegirista se empeñaron en convertir a Omerique en uno de los creadores de la geometría analítica. Este desenfoque impidió durante algún tiempo entender el verdadero interés de su contribución, a pesar de que había sido apreciada por figuras como Newton y Chasles. En una carta escrita hacia 1699, Newton afirma haber examinado el libro de Omerique, al que juzga "una obra juiciosa y de valor que responde a su título, porque expone en la forma más sencilla el medio de restaurar el análisis de los antiguos, que es más sencillo y más a propósito para un geómetra que el álgebra de los modernos. Así, su método le conduce más fácil y directamente a la resolución de los problemas. Generalmente llega a resoluciones más sencillas y elegantes que las obtenidas con el álgebra". Omerique cumplió, en suma, las expectativas que hemos visto había despertado en Kresa, solucionando cuestiones con las que habían tropezado Pappus, Descartes, Schooten y Gregorio de San Vicentio.

"Tras estudiar los elementos geométricos –afirma Omerique– quien desee llamarse geómetra y recoger el fruto de su labor debe disponer de un método que le permita resolver cualquier proposición geométrica.

"Dicho método, sea lo que sea, se

LIBER III. 357

perpendicularis, quare segmenta basis erunt ax. xb, quorum semidifferentia xy ex constructione aequalis est datae k. Triangulum igitur, &c. Quod erat faciendum.

PROPOSITIO XXV.

Data base, altitudine, & aggregato laterum: triangulum exhibere.

Vide Vietam appendicul. 1. R.P. Greg. S. 1 prop. 82.

Esto triangulum, de quo quaeritur axb super data basi ab, latera autem ax. xb. datam ac componant, & perpendiculum xy aequale sit datae g.

Bisecentur ac & ab in m, & p.

ANALYSIS.

Sit igitur	xy ═ g.
Et sint	axa + xcx ═ axa + xbx.
per 9. 2. el. & 13. Int.	2ama + 2mxm ═ 2apa + 2gg + 2pyp.
Et dimid.	ama + mxm ═ apa + gg + pyp.
Vel si fiat	k:k + pyp.
Et auf. k:k.	ama – k:k + mxm ═ pyp.
Vel si fiat	ll + mxm.
Sed per 14 Int. S.P.	aca. aba. pyp. mxm.
Ergo subst. E.P.	aca. aba. ll + mxm. mxm.
Et divid.	aca – aba. aba. ll. mxm.

Página del **Analysis** *(1698), de Omerique, en la que expone la manera de construir un triángulo, dadas su base, su altura y la suma de sus lados. Constituye un significativo ejemplo del método seguido por el matemático gaditano, ya que otro autores tuvieron que recurrir a las secciones cónicas para resolver el mismo problema.*

llama *análisis* o resolución y se define generalmente de esta forma: *adoptar una cuestión como conclusión por sus corolarios que conducen a alguna conclusión*. El camino inverso desde la conclusión a la cuestión se llama *síntesis* o composición. Esta definición, sin embargo, no nos garantiza certeza alguna. Adoptar una cuestión como conclusión implica la dificultad de agrupar los datos y las cuestiones de forma adecuada. Planteada una cuestión como conclusión, ¿qué corolario elegimos entre los muchos que de ella se desprenden? ¿por dónde empezamos? Todo ello ha sido expuesto por los matemáticos de forma imprecisa, por lo que, si el analista no supera el desorden y la confusión de datos y cuestiones, se convierte en un ignorante. Todos reconocen que ninguno de los antiguos llegó a resolver esta dificultad, a pesar de los numerosos volúmenes que le dedicaron, como nos cuenta Pappus en el comienzo del libro séptimo de su tratado; no sin razón, los modernos consideran que no había forma verdadera de resolverla, partiendo de sus proposiciones. Por el contrario, entre los autores más recientes, los cultivadores del álgebra especiosa se creen capaces de superarla. Ojalá fuese la demostración geométrica tan fácil como la resolución algebraica. Sin embargo, es tan distinta que, tras muchos años de aplicar el cálculo algebraico a las demostraciones geométricas, he concluido que se trata de un método inadecuado y me he decidido por un abordaje exclusivamente geométrico.

"Por lo tanto, definimos nuestro análisis de este modo: *adoptar una cuestión como conclusión, avanzando mediante consecuencias necesarias a lo cierto y determinado*. Esta definición parece ofrecernos un progreso seguro. Intentaremos cumplir lo prometido pero, como nos enfrentamos con una materia extraordinariamente difícil, no osamos pensar que hemos acertado plenamente. Por el contrario, respetamos los trabajos dignos de consideración de los numerosos autores que han escrito sobre análisis y confiamos que los nuestros, si son aceptados, sean juzgados y mejorados por ingenios más felices."

Jean Etienne Montucla, en su *Histoire des mathematiques* (1758), y Michael Chasles, en su *Aperçu historique* sobre los métodos en geometría (1837), elogiaron la obra del matemático gaditano en el mismo sentido que Newton, presentándola sobre todo como un intento de restitución de la *Sección determinada* de Apolonio. El método de Omerique, ademas de influir en España, tuvo varios seguidores en distintos países.

Reconstrucción del ambiente a través de los granos de polen

La diversidad morfológica del polen, su conservación y su abundancia relativa en distintos sedimentos posibilitan la reconstrucción de la vegetación y el clima a lo largo de los últimos dos millones de años

María Léa Salgado-Labouriau

Se llama paleoecología la rama de la ecología que describe los ecosistemas del pasado a través del estudio estratigráfico de los fósiles. Entre éstos, los granos de polen constituyen la mejor fuente de información sobre la vegetación que existió en cada región. Estos granos son gametos masculinos de las plantas superiores: gimnospermas (plantas sin fruto, con semillas descubiertas: pinos, abetos, cedros, araucarias, secoyas, efedras, cicas, etcétera) y angiospermas (plantas con flor y fruto).

Los granos de polen presentan una gran variedad de forma, tamaño y ornamentación de acuerdo con la especie vegetal. Hay granos muy pequeños, como los de las mimosas, con menos de 10 micrometros (μm). Los del maíz y de la yuca, que se cuentan entre los mayores, miden, por contra, cien o más micrometros. Sin embargo, el polen de la mayoría de las plantas mide entre 20 y 50 μm. Los granos de polen pueden ser esféricos, elipsoidales o como una pastilla. Los hay sueltos como los granos de harina, cuya característica dio origen a su nombre, sacado del latín *pollen*, que significa harina, polvo fino. Pueden también estar fuertemente unidos en agrupaciones de 2, 4, 16 o más granos. Entre estos últimos está el polen de los brezos, mimosas, aromos, cujíes, acacias, samanes y otros. La superficie de los granos de polen presenta muchas veces ornamentaciones elaboradas con espinas, verrugas, estrías y redes más o menos complejas. Tienen aberturas que varían en número y forma. Toda esta diversidad permite la caracterización del polen de cada especie vegetal y su identificación en muestras de aire, miel y sedimentos donde el polen de diferentes plantas suele estar junto. La forma y estructura de los granos son constantes en una misma especie, pero también muchas especies de un mismo género pueden ofrecer el mismo tipo morfológico. La morfología no suele bastar, pues, para identificar el polen de las distintas especies, sino que caracteriza los géneros y muestra las afinidades entre géneros, familias o categorías taxonómicas superiores.

El citoplasma de los granos de polen está envuelto por la intina, una membrana de celulosa semejante a la membrana de las otras células vegetales. La intina está cubierta externamente por una capa, llamada exina, que también envuelve las esporas de las pteridófitas y que no existe ni en las otras células de las plantas, ni en las de los animales. La exina, por su ornamentación, tipos de abertura y estructura, individualiza los tipos de polen; de ahí el interés del estudio de la misma. Los primeros trabajos morfológicos detallados se debieron, principalmente, a G. Erdman y R. P. Wodehouse hace unos 40 años. Hoy día, la palinología, que se ocupa del estudio de esta membrana, constituye una especialidad más dentro de la botánica, como la fisiología o la anatomía vegetal.

La exina no ha recibido suficiente atención de parte de los químicos, en razón de su gran estabilidad. No es atacada por los ácidos acético, clorhídrico, sulfúrico y fluorhídrico. Resiste a la digestión cuando el polen es ingerido por animales y se mantiene perfecta si es hervida en un líquido a 100 grados Celsius. Resiste parcialmente a sustancias oxidantes, como la potasa (KOH) y el ácido nítrico, pero una exposición prolongada en un medio oxidante termina por destruirla. Gracias a los trabajos de microscopía electrónica de transmisión hechos por J. R. Rowley y otros, sabemos que la exina está formada por una matriz (molde) de esporopolenina, donde se encuentra retenido el glicocálix (nombre de un complejo de proteínas y polisacáridos, que se supone específico –vale decir, exclusivo– de cada especie vegetal). Hasta el momento, las informaciones sobre la estructura química de la esporopolenina son fragmentarias e incompletas. Sin embargo, los métodos químicos de análisis estructural, que han experimentado un notable avance en los últimos 20 años, deberían bastar para el estudio químico de la esporopolenina. La importancia de este conocimiento radica en el hecho de que la exina es la responsable de la morfología de los granos de polen y de su gran resistencia a la descomposición.

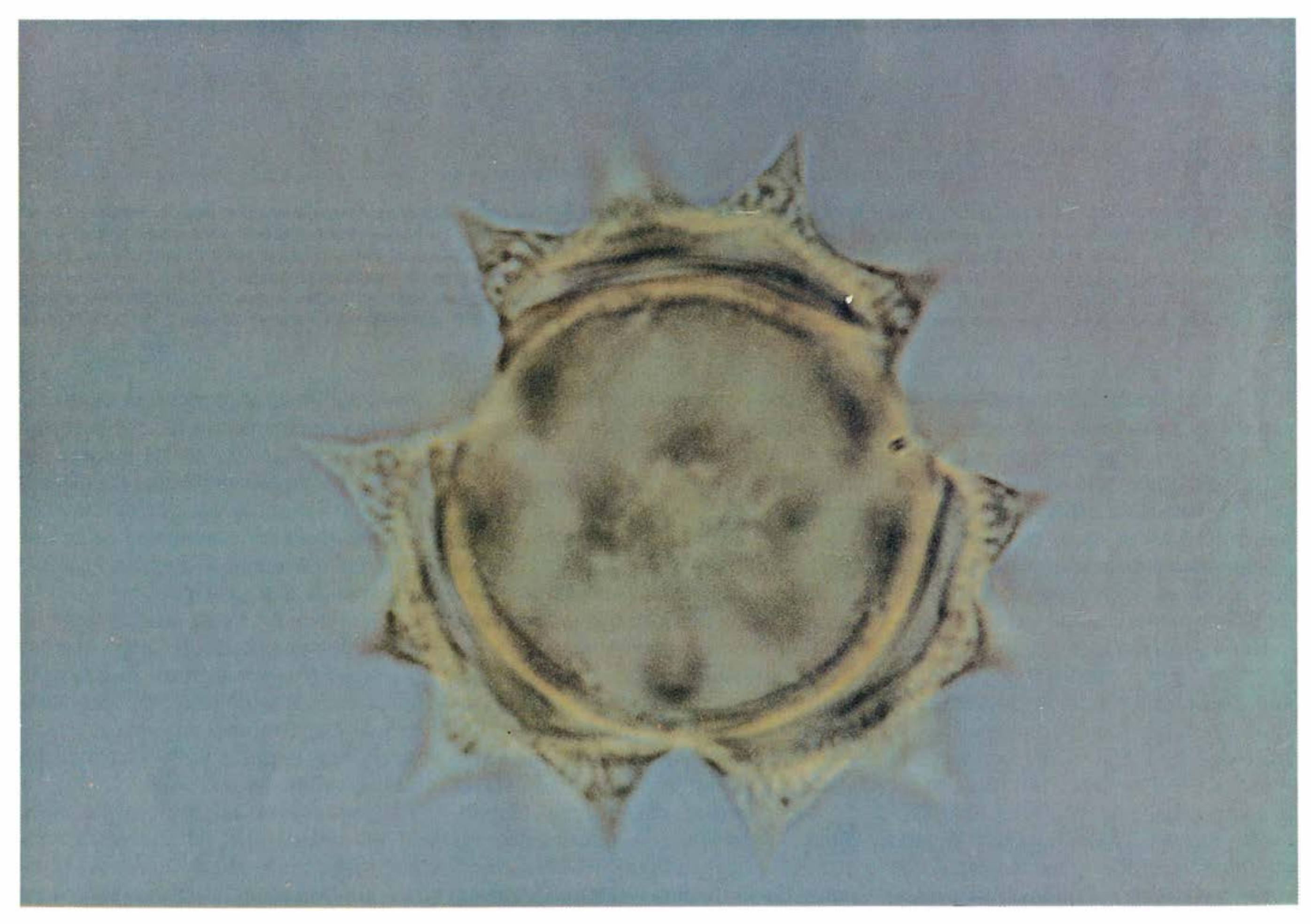
El polen producido en la antera (parte masculina) de una flor llega a la superficie del estigma (parte femenina). Ahí se forman los tubos polínicos que penetran hasta el ovario y se van a fecundar a los óvulos. El polen alcanza el estigma por diferentes mecanismos de transporte, que dependen de la especie: depositado directamente en el estigma de la propia flor (plantas autofecundantes); llevado por animales que visitan las flores en busca de alimento, tales como abejas, colibríes y murciélagos; transportado por el agua en muchas plantas acuáticas, y, finalmente, transportado por el viento a larga o corta distancia para terminar por caer sobre el estigma de una flor de su especie (planta anemófila). A este último tipo de transporte pertenece una gran parte del polen que se acumula en los sedimentos.

Las corrientes de aire transportan el

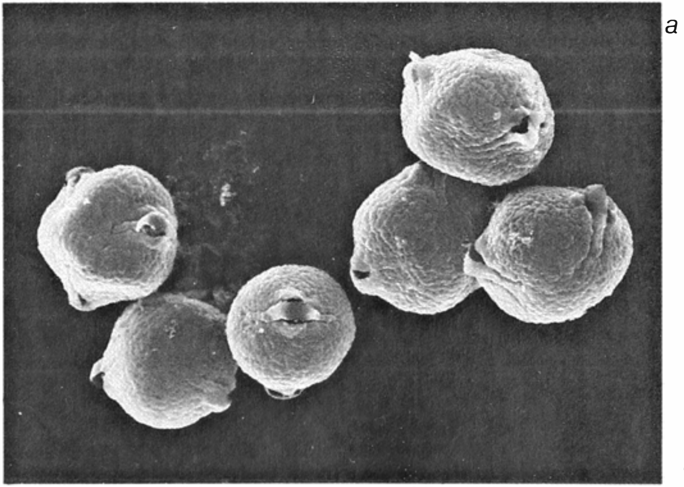
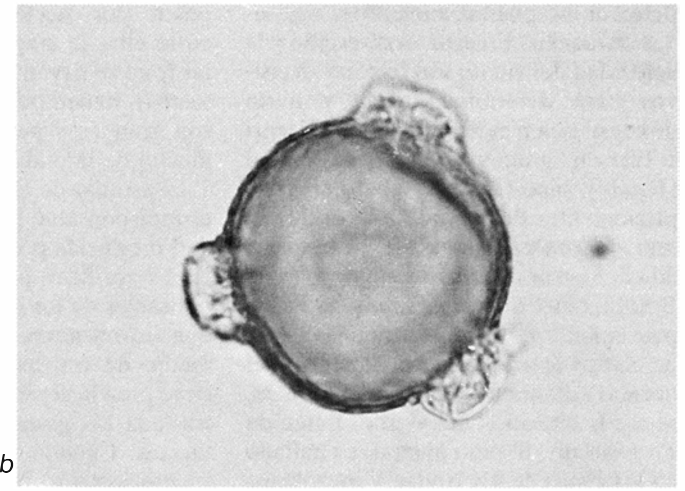
polen de las plantas anemófilas a grandes distancias. En esto, la dirección y la velocidad del viento son factores decisivos para determinar hacia y hasta dónde el polen es llevado. Según Faegri e Iversen, granos de polen de abedul (*Betula*), pino (*Pinus*) y abeto (*Picea*), provenientes del bosque a la orilla del mar, fueron recogidos por un buque a 50 kilómetros de la costa, en el golfo de Botnia, entre Suecia y Finlandia. Polen proveniente de plantas africanas llega, en ciertas épocas del año, al centro del océano Atlántico o a España y Francia, según la dirección del viento. Polen de *Podocarpus*, el pino austral, es hallado en las cimas de los Andes Venezolanos y en las nieves eternas del Kilimanjaro, en Africa, a más de 1500 metros por encima de donde crece el árbol. Muchos géneros de plantas tienen gran cantidad de polen que el viento transportará muy lejos, como el roble (*Quercus robur*), que produce cerca de 110 millones de granos por rama en 10 años, o el pino (*Pinus sylvestris*), que produce anualmente de 10 a 80 kilogramos de polen por hectárea. Otras plantas, entre ellas la mayoría de las entomófilas (que se sirven del transporte por insectos), tienen poco polen o sus granos son grandes y pesados y no se alejan mucho de la planta madre.

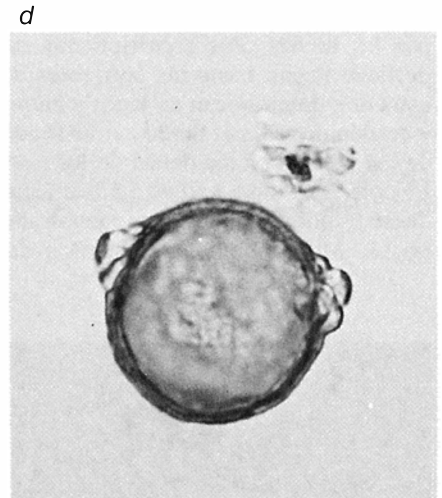
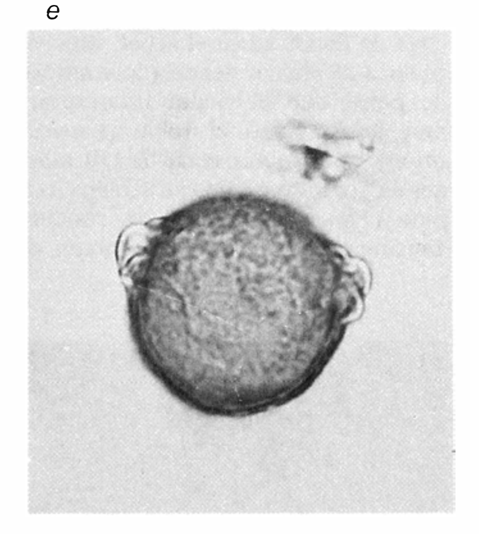
El estudio de la dispersión del polen es indispensable para conocer la cantidad producida por cada tipo de vegetación y verificar qué plantas son las responsables de los granos más frecuentes que encontramos en el aire. Existe otro medio de transporte que, aunque no sirve para la reproducción de la planta, traslada los granos hasta grandes distancias. Cuando el polen cae sobre la vegetación o en la superficie del suelo, o incluso cuando las propias flores caen, sus granos pueden ser arrastrados por las lluvias. Por escurrimiento superficial llegan hasta las corrientes de agua que desembocan en lagos y mares y terminan sedimentando en el fondo de los lagos o en los deltas de los ríos. El polen del aliso andino (*Alnus jorullensis*), por ejemplo, fue encontrado por J. Muller en los sedimentos del delta del río Orinoco (Venezuela) a más de 700 kilómetros de los bosques del aliso. El transporte fluvial no sólo acarrea polen de plantas que son grandes productoras, sino también el de las poco productoras, que suele transportarse de una planta a otra por animales (abejas, coleópteros, murciélagos, colibríes, etcétera).

Cuando las esporas y el polen han madurado, una pequeña fracción de los mismos participa en la reproducción de la especie. Lo que resta cae en la superficie de la tierra y, si encuentra un medio reductor, se va depositando lentamente junto con otros detritos orgánicos e inorgánicos, en capas sucesivas. Se forma entonces un sedimento, donde esporas y polen persistirán. Así han permanecido estratificados millones de años. La gran dispersión de los granos permite reunir, en un sedimento, el polen de las plantas que medran en aquella localidad y el de la vegetación regional de un radio de más de 50 kilómetros.



1. GRANO DE POLEN del frailejón (*Espeletia schultzii*), una compuesta de los Andes Venezolanos, fotografiada en el microscopio óptico. El contenido citoplasmático se eliminó por tratamiento químico; la exina, que es la membrana externa del polen, muestra su transparencia. Se aprecia claramente su estratificación en dos capas concéntricas separadas por un espacio vacío y cómo las grandes espinas de ornamentación se sostienen por columnas.

2. DISTINTAS ESPECIES DE LA TRIBU SANGUISORBA (que se inscriben dentro de la familia Rosaceae) ofrecen la misma morfología de polen, ejemplificada aquí por el de *Polylepis incana*, fotografiado en microscopio de barrido (*a*). Dos de sus géneros concurren en el mismo ecosistema, el páramo andino. El coloradito, *Polylepis sericea* (*b* y *c*) y otras especies de este género, como las quenuas, son árboles pequeños que forman bosquecillos de las partes más altas de los Andes. El género *Acaena* lo integran especies herbáceas de las regiones de clima frío. La hierba de oso, *Acaena cylindrostachia* (*d* y *e*), vive en las praderas de los páramos andinos. La presencia de polen de este tipo en sedimentos parameros puede significar un bosque (*Polylepis*) o una pradera (*Acaena*). Para distinguir entre los dos fue necesario un estudio de la ultraestructura y un análisis estadístico del tamaño del polen de cada especie.

La acumulación año tras año en estas capas sucesivas forma un registro cronológico de la vegetación que existió en esta región para cada intervalo de tiempo. El análisis de esporas y granos de polen contenidos en estos estratos nos permite determinar qué plantas existieron entonces, relatándonos la historia de la flora en el pasado geológico.

En el período Devónico de la era Paleozoica, hace unos 400 millones de años, las pteridófitas (licopodios, helechos, etcétera) dominaron el paisaje terrestre. Del Carbonífero en adelante (cerca de 300 millones de años) se les añadieron las gimnospermas. Sus esporas y granos de polen nos han llegado en abundancia y en perfecto estado de conservación en los sedimentos correspondientes a estas eras, lo que posibilita estudiarlos en detalle. En esos tiempos existieron otras plantas, pero sus esporas o polen no se preservaron y las conocemos solamente por los fragmentos de ellas que se fosilizaron en condiciones muy especiales. Tampoco abundan como el polen y las esporas.

El estudio de los macrofósiles (hojas, troncos, rizomas) unido al de esporas y polen muestra qué grupos enteros de plantas surgieron, se desarrollaron y después se extinguieron. Muchas formas fueron remplazadas por otras plantas. De cuantas medraron en las eras Paleozoica y Mesozoica solamente algunas llegaron hasta nuestros días sin grandes cambios. Así, entre las Licopodíneas sobrevivieron únicamente los géneros *Lycopodium* y *Selaginella*; entre las Ginkgoales (gimnospermas), una especie, *Ginkgo biloba*. Dos ejemplos que nos hablan de la gran extinción en el proceso evolutivo; nuevos tipos de plantas surgieron continuamente y sustituyeron a los que se terminaban. La sucesión de las plantas durante este larguísimo intervalo de más de 300 millones de años es un tema fascinante, pero su complejidad exige una cantidad de detalles que escapan del objetivo de este artículo.

Al final de la era Mesozoica surge un nuevo tipo de plantas, las angiospermas o plantas con flor y fruto. Por su gran adaptación a las condiciones ambientales más dispares, invadieron y colonizaron la mayor parte de la Tierra en un tiempo relativamente corto.

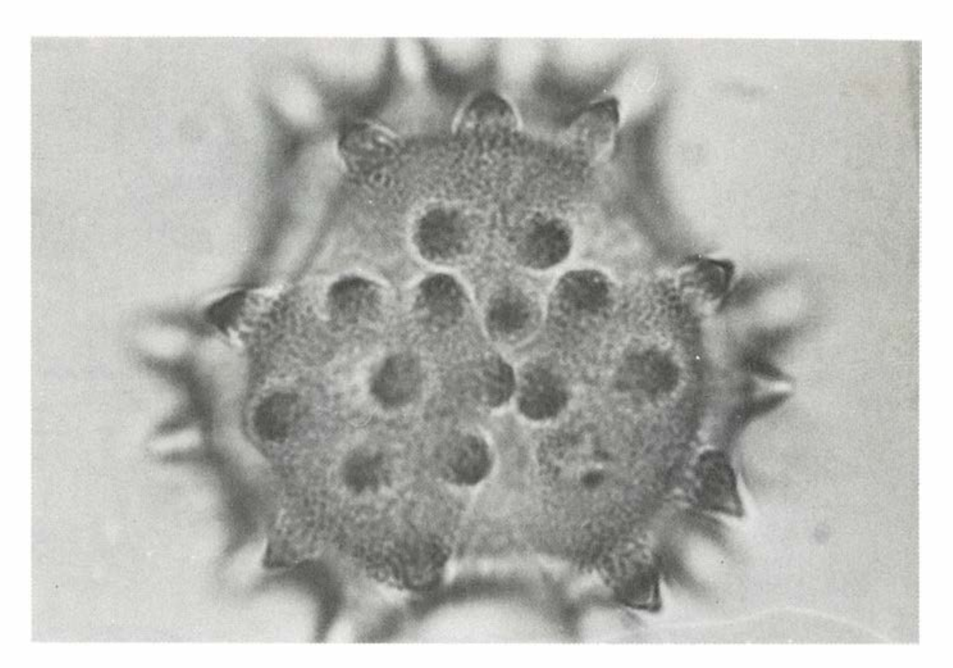
El polen de las angiospermas aparece en los sedimentos del Cretácico inferior, hace unos 130 millones de años. Los granos de angiospermas surgen en pequeño número entre una copiosa cantidad de polen de gimnospermas y esporas de pteridófitas. Son granos de

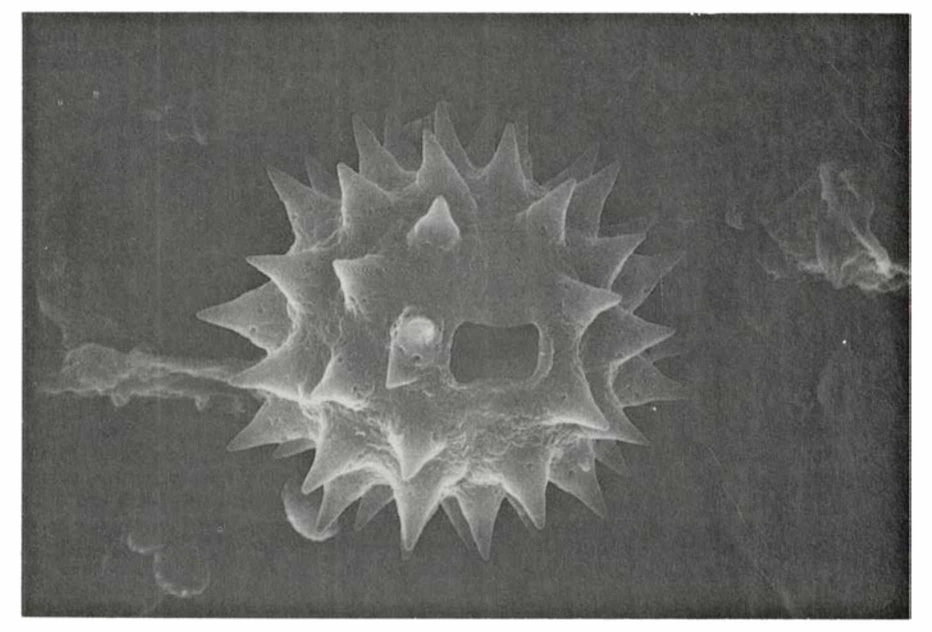
estructura y ornamentación simples. El polen de angiosperma de este tiempo no se asemeja a ninguna de las plantas modernas; sólo cabe hablar de posibles afinidades con órdenes (taxón superior a la familia) de plantas actuales. En el Cretácico inferior representa posiblemente a los órdenes de las Ranales, Papaverales, Theales, Dilleniales y Trochodendrales. Sus plantas debieron encontrarse en pequeño número, en un ambiente dominado por gimnospermas y pteridófitas.

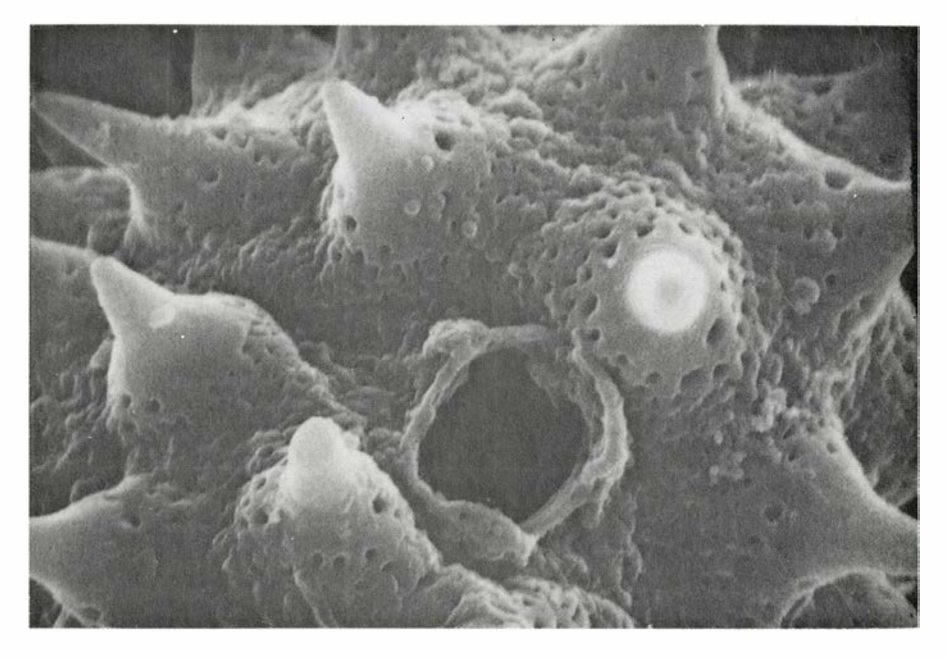
A medida que avanza el Cretácico, surgen tipos polínicos más diversificados y más elaborados. Sus frecuencias siguen aumentando hasta que en el Cretácico medio, hace aproximadamente 90 millones de años, dominan en número sobre el polen de las gimnospermas y las esporas de las pteridófitas. Algunos grupos se extinguen, como los "normapolles" y "aquilapollenites", pero varios tipos polínicos de angiospermas continúan hasta la actualidad, permitiendo de esta manera su identificación a nivel de género. A finales del Cretácico, ya es posible identificar, entre otros, a *Nypa* (una palma), *Ilex* (el acebo, el jaque negro, etc.), *Alnus* (el aliso), *Juglans* (la nogueira), *Nothofagus* (el cohué de los Andes meridionales y las otras hayas sureñas).

Al iniciarse el Terciario (hace unos 70 millones de años) el polen de los géneros modernos aumenta progresivamente. Desde el Oligoceno (hace 40 millones de años) una gran parte de las familias de angiospermas nos resulta conocida gracias al polen abrigado en sedimentos. Con los géneros modernos ocurre que, una vez identificados, se sabe cuáles son sus exigencias ecológicas, condiciones que debieron ser las mismas en el pasado. El género *Alnus* (el aliso), por ejemplo, está constituido por especies de pequeños árboles y arbustos que se encuentran principalmente en la orilla de los ríos, en climas templados del norte y de las altas montañas tropicales. Su presencia en sedimentos indica un clima frío y la concurrencia de un río o lago en el lugar.

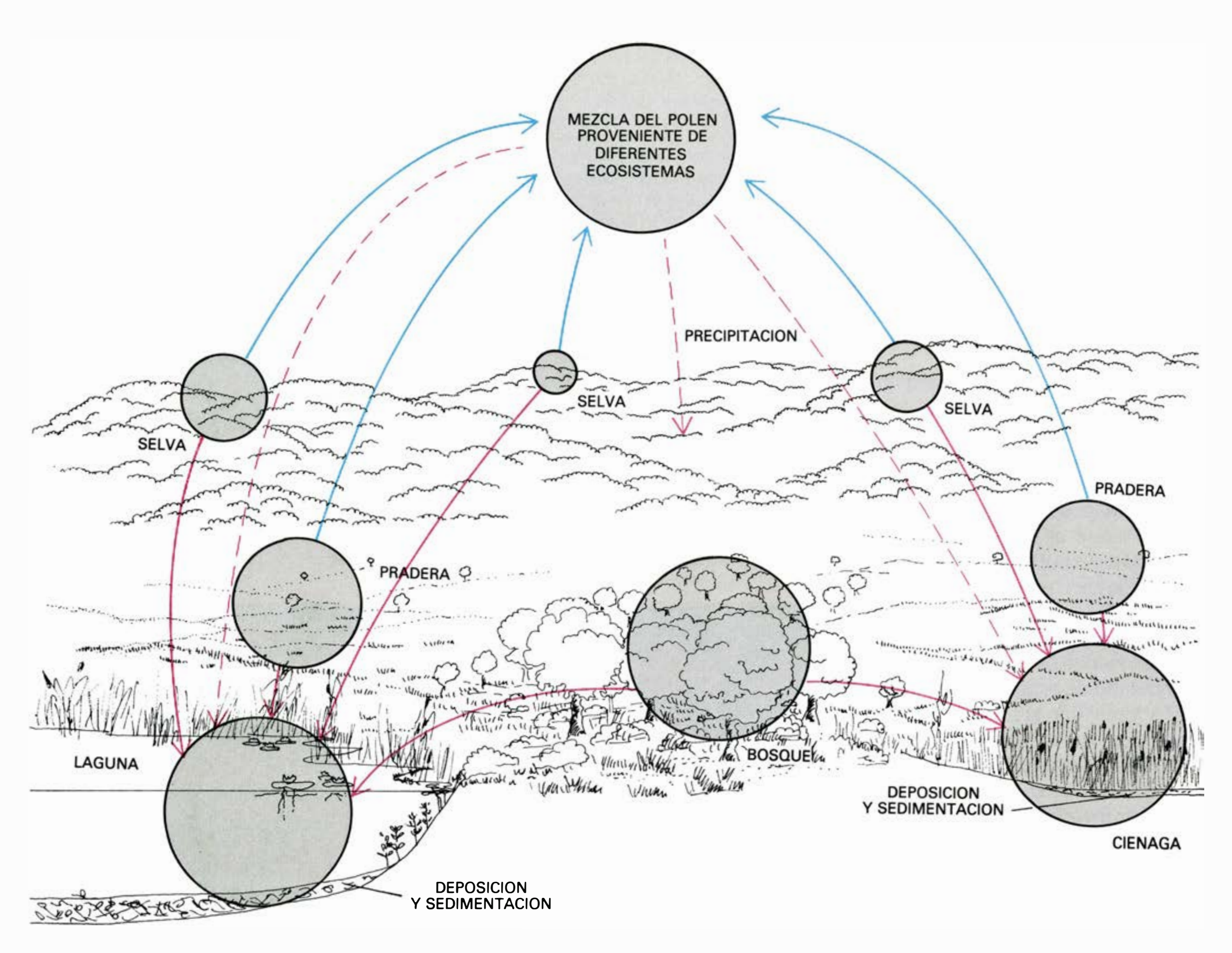
Los actuales géneros *Nypa* (una







3. COMPLEJIDAD MORFOLOGICA de los granos de polen de las compuestas. Queda ilustrada en estas fotografías, tomadas con microscopio óptico: *Gymnoxys violacea* (*arriba*), *Espeletia schultzii* (*centro*) y *E. jimenez-quezadae* (*abajo*). Los granos tienen tres aberturas grandes dispuestas como en los vértices de un triángulo. La superficie de la exina puede ser perforada por minúsculos agujeros que varían en tamaño y densidad según la especie.



4. TRANSPORTE DE POLEN Y ESPORAS por el viento. Los granos pueden ser llevados hasta una corta distancia, de una planta a otra dentro del mismo ecosistema, o pueden ser acarreados por corrientes de aire ascendentes hacia la atmósfera, donde los procedentes de diferentes tipos de vegetación se mezclan y forman una suspensión homogénea. Después de horas o días incluso, estos granos empiezan a caer sobre la tierra lenta y continuamente, como una "lluvia" (precipitación polínica). La planta (llamada anemófila) produce una gran cantidad de granos y sólo una pequeña parte del polen producido llega al estigma de la flor de su especie y fecunda los óvulos. Lo mismo ocurre con las esporas, de las que sólo algunas caen en el suelo propio para el desarrollo de la planta. La mayor parte de los granos que constituye la precipitación polínica cae sobre la superficie de la tierra y se puede depositar en el fondo del mar, lagos, lagunas o en ciénagas y turberas; allí estas partículas se acumulan con otros detritos y forman, lentamente, el sedimento.

palma), *Rhizophora* (mangle colorado) y *Avicenia* (otro mangle) medran en un solo tipo de vegetación, llamado manglar, en las costas marinas tropicales. La presencia de polen de estos tres géneros juntos, en el Eoceno, hace 50 millones de años, indica el inicio del ecosistema del manglar. El conjunto de polen hallado en una determinada profundidad del sedimento (nivel estratigráfico) de una región es, pues, constante; los granos presentes nos dan la clave del tipo de vegetación y del clima en aquel nivel (o tiempo).

Sólo cuando es posible relacionar el polen fósil con géneros o especies modernos cabe reconstruir el ecosistema. Desafortunadamente, algunas familias, así las Marantáceas, Musáceas y otras, tienen polen con exina muy frágil, lo que impide su conservación; la palinología no puede entonces describirnos su desarrollo evolutivo.

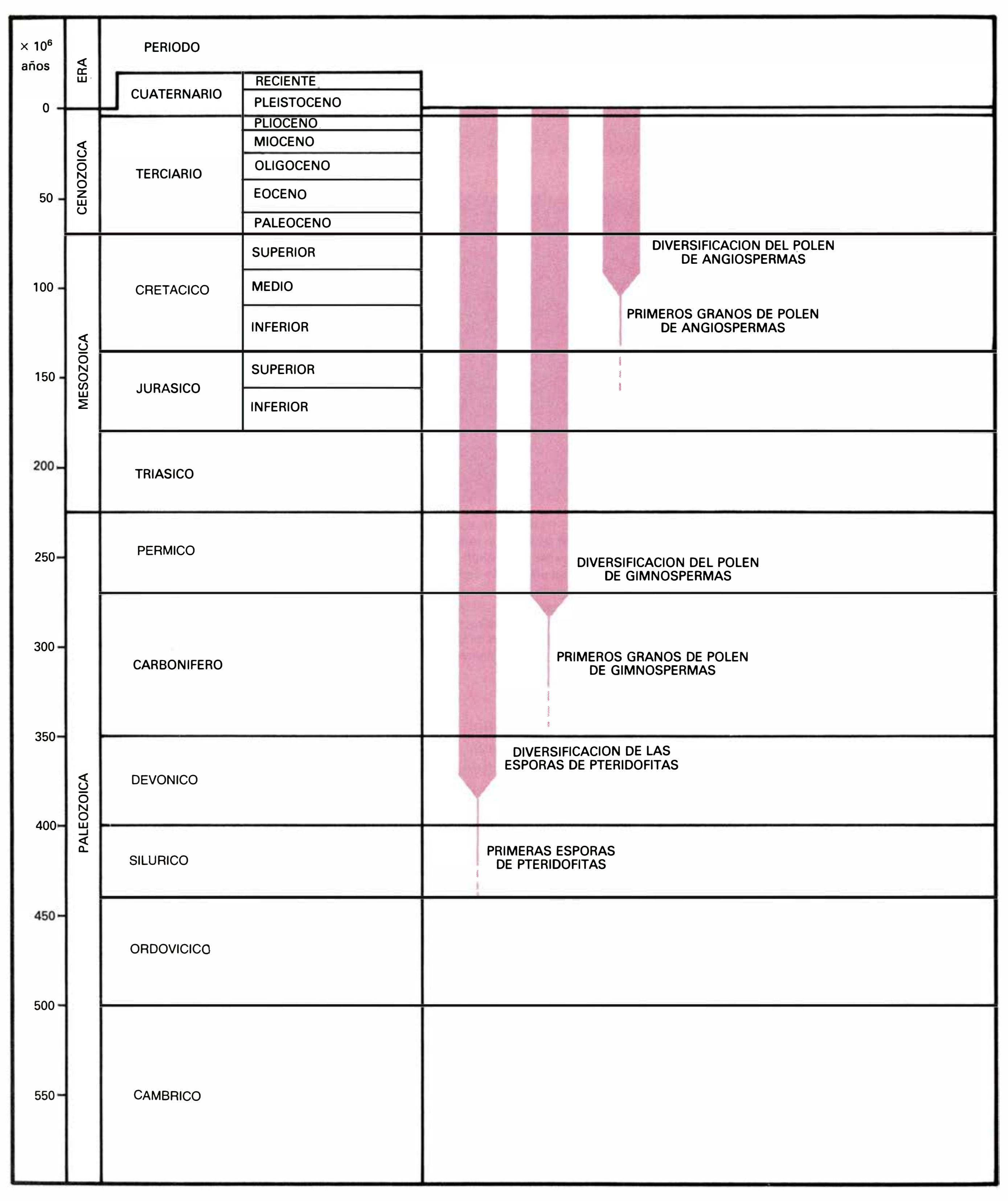
En el Cretácico inicial la flora era similar en regiones hoy muy distintas. En las postrimerías de ese período y a lo largo de la era Terciaria el provincialismo se fue acentuando: muchos tipos se limitaron a áreas restringidas y la flora de una región se alejó cada vez más de la característica de regiones vecinas.

El aumento del provincialismo, principalmente durante el Terciario, es un indicio más de la deriva de los continentes, propuesta por Alfred Wegener en 1910, hoy día comprobada y explicada en el marco de la teoría general de la tectónica de placas. Cuando Laurasia y Gondwana se fragmentaron en el Cretácico, estos fragmentos se distanciaron por la formación del océano Atlántico; la flora de cada fragmento quedó genéticamente aislada. Los continentes recién formados se desplazaron independientemente, lo que resultó en un aislamiento y cambios progresivos en la latitud para cada fragmento. Simultáneamente, comenzó una fase de formación de montañas. En consecuencia, cambió el clima en muchas partes y hubo extinciones, mutaciones y adaptaciones en distintos niveles de los biotas. El provincialismo detectado en los fósiles con diferenciación latitudinal y topográfica es el reflejo de estos cambios ambientales en cada subcontinente. El mecanismo del movimiento de las placas tectónicas y el desplazamiento consecuente de los continentes se explica muy bien en el número de noviembre de 1983 de *Investigación y Ciencia*, dedicado al dinamismo terrestre.

La flora polínica del Terciario, tal como la conocemos hoy día, no describe la vegetación total de la Tierra en aquel tiempo, porque los análisis de polen del Terciario (así como de los períodos más antiguos) provienen de sedi-

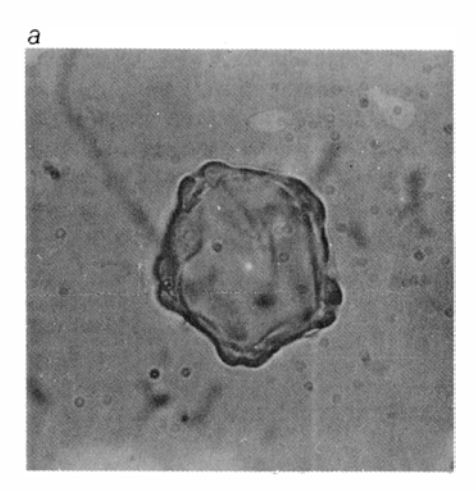
mentos costaneros, esto es, de los estuarios de ríos y sedimentos marinos en aguas poco profundas. Aun cuando el viento o el caudal de los ríos pueden transportar el polen y las esporas de muchos géneros a gran distancia, no es posible reconstruir la vegetación del interior de los continentes ni la de las cimas de las montañas con los datos disponibles. Por otro lado, muchísimas especies del Terciario se extinguieron y fueron sucesivamente sustituidas por otras, lo que dificulta también una fiel recreación de los ambientes. A pesar de todas estas limitaciones, los análisis de sedimentos terciarios muestran resultados ecológicos interesantes: la reconstrucción de las floras estuarinas y la indicación de la antiguedad de los manglares.

Todos los tipos polínicos conserva-

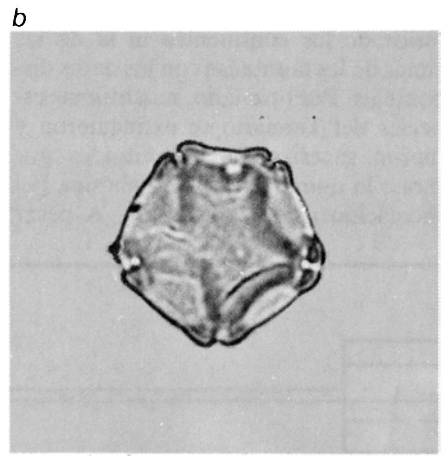


5. ESCALA DE TIEMPO GEOLOGICO y su correlación con la época de origen de los grandes grupos de plantas vasculares, de acuerdo con los análisis de polen y esporas. Cada grupo se origina con algunos pocos tipos de granos y después de un intervalo de tiempo relativamente largo entra en una fase de diversificación morfológica. Las pteridofitas están hoy representadas por los helechos, licopodios, etc.; las gimnospermas, por pinos, abetos y otros.

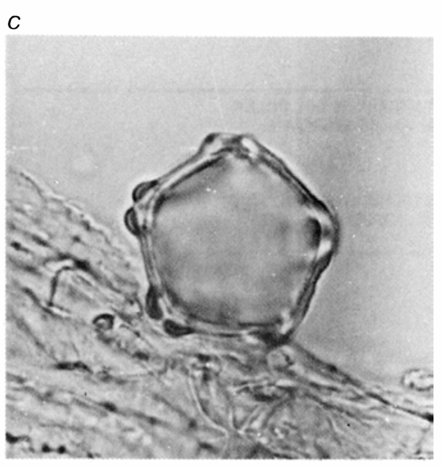
a



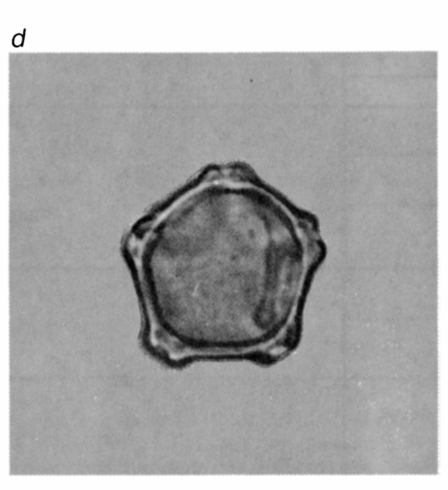
b



c



d



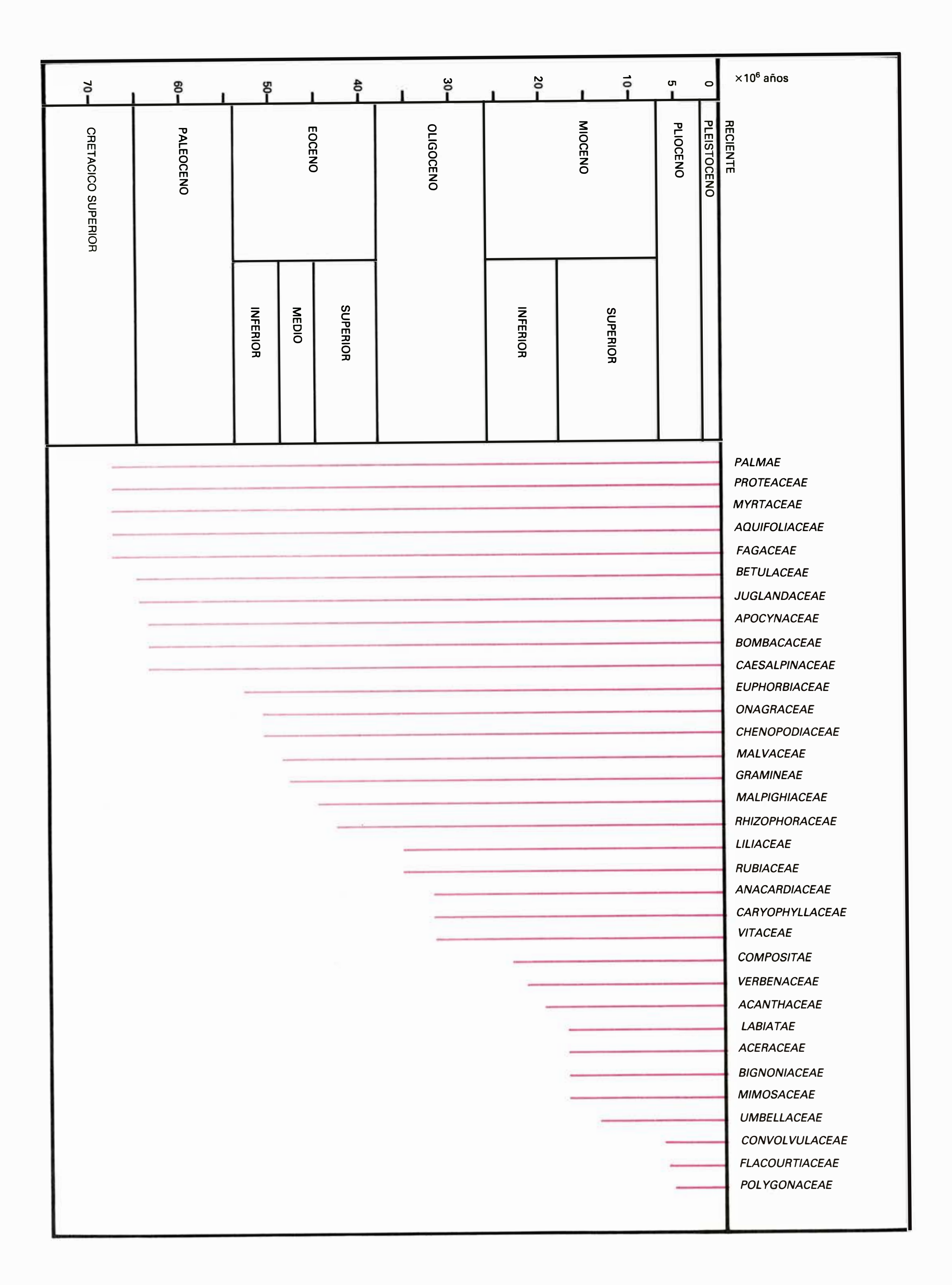
6. PARA IDENTIFICAR EL POLEN contenido en los sedimentos se recurre a su comparación con el polen de plantas modernas. Los granos de las fotografías *a*, *b* y *c* son del mismo tipo polínico. El primero, arriba a la izquierda, es un grano de polen que proviene de una perforación en el fondo del mar Caribe a 30 kilómetros al este de la isla de Tortuga, Venezuela. (Fotografía cedida por Estela de Di Giacomo.) Este tipo polínico caracteriza la base inferior del Pleistoceno (aproximadamente 2 millones de años), en Venezuela; el de su derecha es un grano del final del Pleistoceno, aproximadamente 50.000 años antes del presente, de una terraza fluvial en los Andes venezolanos; *c* es de otra terraza andina fechada en 12.390 años antes del presente; y *d* es el grano de polen *Alnus jorullensis*, un árbol moderno de la selva andina. La semejanza entre estos granos muestra que los granos antiguos pertenecen al género *Alnus* (el aliso).

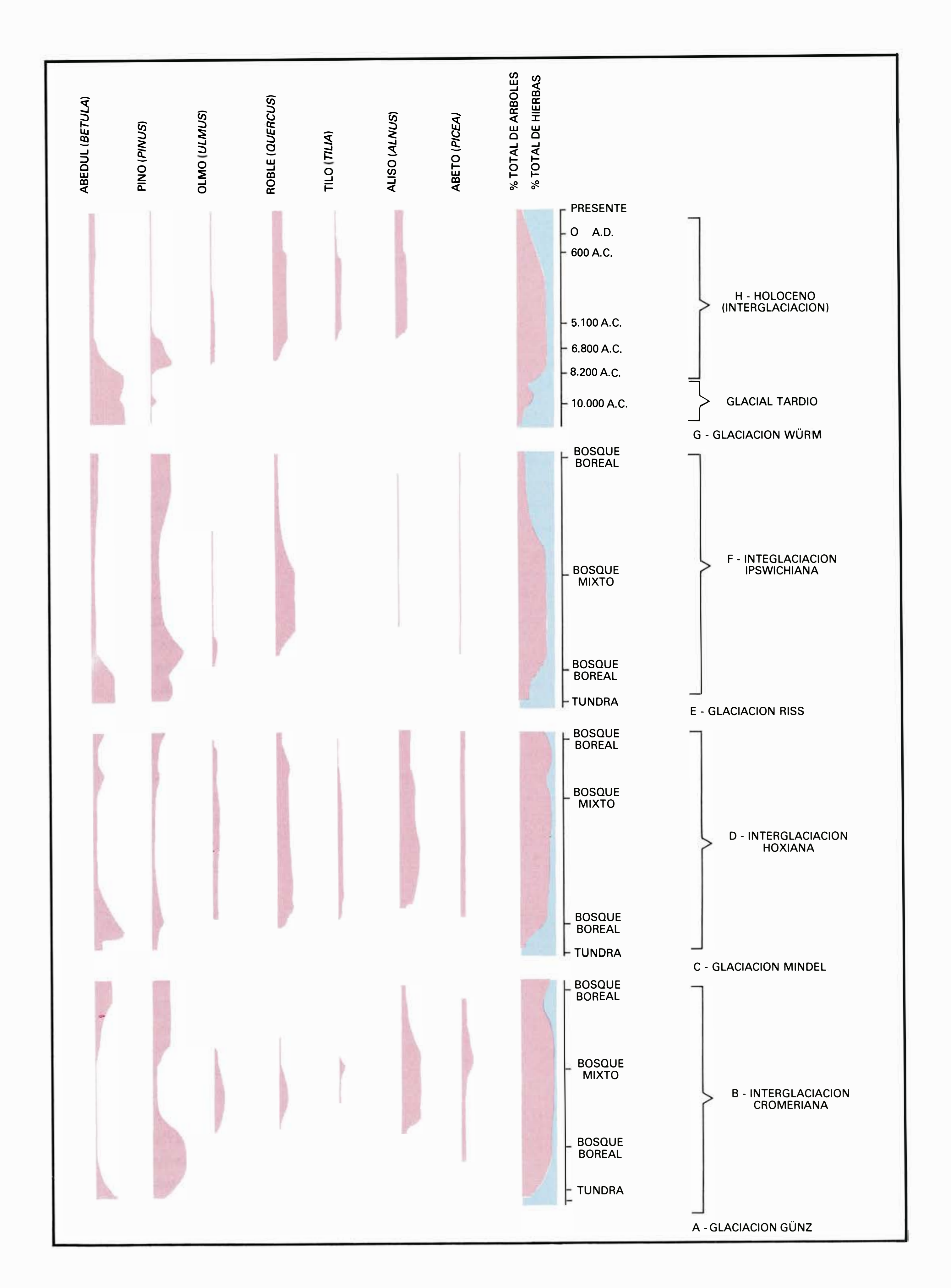
dos en los sedimentos del Cuaternario, hace unos dos millones de años, son susceptibles de comparación con géneros modernos y, en algunos casos singulares, con especies modernas. Dicho de otro modo, podemos reconstruir los ecosistemas y estudiar la sucesión de vegetación en una región. Los análisis de polen del Cuaternario cubren una amplia variedad de ambientes. Además de los sedimentos marinos y estuarinos, rasgo que comparten con los períodos anteriores, existen datos sobre sedimentos de turberas, ciénagas y lagos, provenientes del interior de los continentes. Por cuya razón, la recreación de los ecosistemas cuaternarios es más precisa.

Los dos o tres millones de años de esta era se caracterizaron por grandes alteraciones climáticas. En las regiones templadas de la Tierra, las glaciaciones, con miles de años de duración, se alternaron con intervalos de tiempo más cálidos y de menor duración, las interglaciaciones. Cada vez que el clima se hacía más cálido, los glaciares se reducían y retrocedían hacia los polos. El terreno desprovisto de materia orgánica del que se retiraba el hielo empezaba a ser colonizado por plantas. Un esquema de la sucesión de bosques en Inglaterra durante el Cuaternario se halla ilustrada en la figura 8, donde se muestra, a través del análisis de polen en sedimentos, que, al final de la primera glaciación, el clima se volvió gradualmente más cálido. Una vegetación tipo tundra ocupó progresivamente los territorios abandonados por los hielos. Las hierbas dominaron y la vegetación era escasa (fase 1 en la base del diagrama). A la tundra sucedieron bosques de abedul (*Betula*) intercalados con vegetación abierta (fase 2). Poco a poco el abedul se unió al pino (fase 3) y se formaron bosques boreales, en un clima frío. Más tarde, el clima se calentaría más, pues el bosque boreal fue remplazado por un bosque mixto de coníferas (pinos, abetos) y angiospermas (olmo, roble, tilo, aliso): fase 4. Al final de esta fase 4, el polen de angiospermas decreció hasta desaparecer; el pino y las hierbas aumentaron, lo que indica que el clima volvió a enfriarse. Por último, desapareció todo tipo de polen y el sedimento fue sustituido por hielo glacial; lo que nos revela la aparición de una segunda glaciación (C). A esta glaciación le sucedió otro intervalo interglacial, semejante al primero, con formación y expansión de los bosques. Los intervalos glaciales e interglaciales se alternaron sucesivamente por lo menos 16 veces hasta el presente, cuando nos hallamos en una fase interglacial llamada Holoceno. Los intervalos glaciales fueron mucho más largos que los interglaciales; así pues, si los cambios climáticos siguen con el mismo ritmo anterior, en unos diez mil años más deberá iniciarse una nueva y larga glaciación.

Sucesiones semejantes a estas ocurrieron en las diferentes regiones templadas de Eurasia y de las Américas. La última glaciación ocurrió (al igual que las glaciaciones anteriores) aproximadamente en forma simultánea en toda la tierra y duró cerca de cien mil años. En América del Norte, las capas de hielo cubrieron Canadá y Estados Unidos hasta la latitud de Nueva Inglaterra. Hace un poco más de 10.000 años, el hielo empezó a fundirse y los glaciares se retiraron gradualmente hacia el polo norte. Las especies arbóreas que se hallaban al sur del frente de hielo empezaron a emigrar hacia el norte, acompañando el retroceso de los glaciares. Los árboles se establecieron

7. TIEMPO GEOLOGICO E INICIO DE LAS ANGIOSPERMAS modernas más comunes, según análisis de polen. Algunas familias de distribución geográfica muy restringida no estuvieron representadas. A medida que se desarrollaba el Terciario, fueron surgiendo más familias modernas, hasta que, al inicio del Cuaternario, todos los granos de polen contenidos en sedimentos pueden ser relacionados con plantas modernas. Si conocemos las condiciones ecológicas de desarrollo de estas plantas en el presente, podemos suponer que ellas vivieron bajo estas mismas condiciones en el pasado, y reconstruir el tipo de vegetación y el clima de aquel tiempo. El cuadro está basado en los resultados del análisis de polen hasta 1970 en una revisión hecha por Jan Muller. Estudios futuros podrán modificar mucho este cuadro, porque estos resultados suelen deberse a trabajos estratigráficos en núcleos de perforación de compañías petroleras y no a investigaciones dirigidas a estudiar el origen y la secuencia evolutiva de las angiospermas.


×10^{6} años
70
60
50
40
30
20
10
5
0
CRETACICO SUPERIOR
PALEOCENO
EOCENO
INFERIOR
MEDIO
SUPERIOR
OLIGOCENO
MIOCENO
INFERIOR
SUPERIOR
PLIOCENO
PLEISTOCENO
RECIENTE
PALMAE
PROTEACEAE
MYRTACEAE
AQUIFOLIACEAE
FAGACEAE
BETULACEAE
JUGLANDACEAE
APOCYNACEAE
BOMBACACEAE
CAESALPINACEAE
EUPHORBIACEAE
ONAGRACEAE
CHENOPODIACEAE
MALVACEAE
GRAMINEAE
MALPIGHIACEAE
RHIZOPHORACEAE
LILIACEAE
RUBIACEAE
ANACARDIACEAE
CARYOPHYLLACEAE
VITACEAE
COMPOSITAE
VERBENACEAE
ACANTHACEAE
LABIATAE
ACERACEAE
BIGNONIACEAE
MIMOSACEAE
UMBELLACEAE
CONVOLVULACEAE
FLACOURTIACEAE
POLYGONACEAE


ABEDUL (BETULA)
PINO (PINUS)
OLMO (ULMUS)
ROBLE (QUERCUS)
TILO (TILIA)
ALISO (ALNUS)
ABETO (PICEA)
% TOTAL DE ARBOLES
% TOTAL DE HIERBAS
PRESENTE
O A.D.
600 A.C.
5.100 A.C.
6.800 A.C.
8.200 A.C.
10.000 A.C.
H - HOLOCENO
(INTERGLACIACION)
GLACIAL TARDIO
G - GLACIACION WÜRM
BOSQUE
BOREAL
BOSQUE
MIXTO
BOSQUE
BOREAL
TUNDRA
F - INTEGLACIACION
IPSWICHIANA
E - GLACIACION RISS
BOSQUE
BOREAL
BOSQUE
MIXTO
BOSQUE
BOREAL
TUNDRA
D - INTERGLACIACION
HOXIANA
C - GLACIACION MINDEL
BOSQUE
BOREAL
BOSQUE
MIXTO
BOSQUE
BOREAL
TUNDRA
B - INTERGLACIACION
CROMERIANA
A - GLACIACION GÜNZ

en el nuevo territorio, florecieron y parte de su polen se depositó en el suelo. Año tras año, este polen se acumuló en las ciénagas y fondos de los lagos. Mientras los glaciares retrocedían, estos árboles avanzaban hacia el norte y su antiguo territorio era ocupado por otras especies que necesitaban temperaturas más elevadas para su desarrollo. De esta manera, el polen acumulado en capas sucesivas nos muestra la sucesión de la vegetación en una región y la velocidad y dirección de emigración de cada especie. Margaret Davis determinó que esta velocidad era de 100 a 400 metros por año, según la especie, en los Estados Unidos.

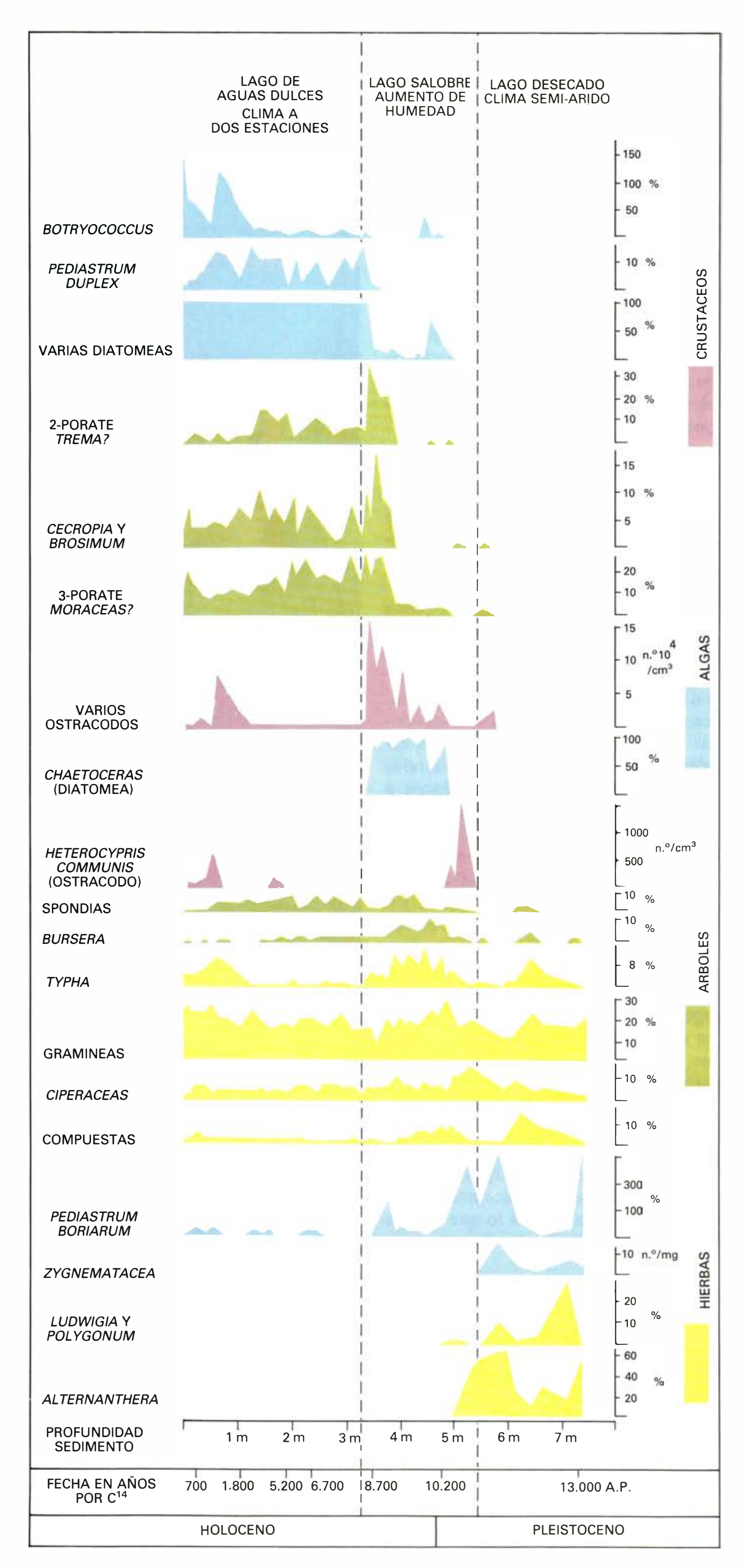
El polen contenido en los sedimentos puede también indicar cuándo se inició la agricultura en una zona. Los primeros estudios sobre el particular fueron hechos en Dinamarca por J. Iversen, y se basan en la disminución de polen arbóreo seguido por la presencia de polen de cereales y de las "malas hierbas", asociadas desde entonces con los cultivos.

Durante mucho tiempo se pensó que, a lo largo de las glaciaciones e interglaciaciones de las zonas templadas, la zona tropical gozaba de un clima estable. Estabilidad climática que, se suponía, sería la causa de la gran diversidad de la flora tropical, la cual se desarrollaría sin la presión de fuertes cambios climáticos. Estudios geológicos y palinológicos en las altas montañas tropicales de Africa, América del Sur y Nueva Guinea mostraron que allí también hubo glaciaciones. Los glaciares bajaron hasta más de 1500 metros en elevación y cubrieron los pisos altitudinales que en el presente están ocupados por selva. Los pisos de vegetación fueron deprimidos hacia elevaciones más bajas y comprimidos en su extensión vertical. En los intervalos interglaciales hubo una expansión hacia arriba de la vegetación.

Poco se conoce de lo que sucedió en las tierras bajas tropicales durante los fuertes cambios climáticos del Cuaternario. A partir de estudios geomorfológicos en lagos tropicales, se supone que estas regiones sufrieron intervalos de gran sequía intercalados con intervalos de gran pluviosidad. Durante los intervalos de sequía, las sabanas se expandían y las selvas se restringían a pequeñas áreas de refugio. En los intervalos de gran pluviosidad, las selvas extendían sus áreas y las sabanas quedaban aisladas en áreas de refugio. Sin embargo, este esquema resulta demasiado simple, pues no se han tomado en consideración los bosques de las regiones semiáridas, tales como el cardonal, el espinar, la *caatinga*, ni tampoco los bosques secos deciduos y semideciduos, que debieron desempeñar también un papel importante en las oscilaciones climáticas.

El análisis de polen de los sedimentos del lago de Valencia, en las tierras calientes ecuatoriales del norte de América del Sur, mostró que los sedimentos depositados entre 13.000 y 10.000 años antes del presente contienen una frecuencia muy baja de polen arbóreo y muy alta de hierbas, entre ellas especies típicas de ciénaga. Las algas y animales planctónicos (que flotan libremente en el agua) están ausentes, mientras que abundan las zigosporas de las Zignematáceas, que son esporas de resistencia de suelos desnudos o piedras. Estos datos nos inducen a concluir que, cuando los glaciares de las partes más altas de los Andes iniciaron su retroceso, hace más de 13.000 años, el actual lago (con 360 kilómetros cuadrados de superficie) no existía. En la región que ocupa en el presente había ciénagas o lagunas intermitentes. El conjunto de polen hallado en esta fase sugiere que la región alrededor del lago tenía una vegetación semiárida y un clima muy seco. Lluvias esporádicas, aunque torrenciales, aumentaban rápidamente el caudal de los ríos y arrastraban gran cantidad de piedras hacia las depresiones, formando lagunas intermitentes que se secaban parcial o totalmente en los largos períodos de sequía. Estas acumulaciones de piedras de canto rodado en lo que debían haber sido deltas de ríos fueron com-

8. SUCESION DE BOSQUES en Inglaterra durante algunos de los intervalos del Cuaternario, según análisis de polen. Los sedimentos más antiguos se encuentran en la base del diagrama y el actual, arriba. Se ilustra el porcentaje de polen hallado en cada nivel (tiempo) sucesivo para algunos géneros arbóreos escogidos. Se representa, asimismo, el porcentaje total de árboles comparado con el de hierbas. Obsérvese que el período durante el cual se depositó el polen de cada género y su frecuencia de acumulación son distintos en cada interglaciación. Estas variaciones, dentro del conjunto de polen acumulado, caracterizan el interglacial y permiten reconocer y fechar un sedimento; principio que se usa comúnmente en estratigrafía geológica para correlacionar sedimentos de la misma edad. Durante las glaciaciones no hubo deposición de polen porque la superficie estaba cubierta por hielo glaciar y probablemente la vegetación del entorno era muy escasa. Las glaciaciones duraron mucho más tiempo que los intervalos interglaciales; por cuestión de espacio nos hemos visto obligados a reducirlas en el gráfico. Los datos provienen de los resultados de investigaciones palinológicas realizadas principalmente por H. Godwin y R. G. West.



9. **MICROFOSILES más frecuentes hallados en los sedimentos del lago de Valencia, en Venezuela. Resumimos aquí un estudio multidisciplinar en que el polen fue estudiado por B. Leyden y María Léa Salgado-Labouriau, las algas diatomeas por J. P. Bradbury; las algas clorococales, por Leyden y Salgado-Labouriau; las algas zygnematáceas por Salgado-Labouriau; y los crustáceos y otros microfósiles animales por M. W. Binford. El diagrama recrea la historia del lago. El Pleistoceno superior se caracteriza por elementos de ciénaga: *Alternanthera, Ludwigia, Polygonum* y zygnematáceas; el lago estaba reducido a una laguna intermitente o remplazado por una ciénaga. En el límite entre el Pleistoceno y el Holoceno predominaban elementos de agua salobre: *Heterocypris communis*, *Chaetoceros* sp. y un aumento de *Bursera* y *Spondias*; en esta fase se inicia el lago que tenía agua salobre y playas con suelos un poco salinos. Durante el Holoceno el lago se caracteriza por algas y crustáceos planctónicos de agua dulce; en esta fase el lago se expandió y estabilizó. En fechas más recientes vuelven los ostrácodos de agua salobre que, junto a otros datos no presentados en el diagrama, indican que la salinidad aumenta hacia el presente. El lago de Valencia se está secando. Otros elementos que corroboran esta interpretación no están representados en el diagrama. Por una justa interpretación paleoecológica de esta región, véase el texto.**

probadas por C. Schubert y M. Laredo, fundándose en estudios geofísicos del subsuelo.

Hace aproximadamente 10.000 años, se produjo un cambio fuerte del conjunto de polen depositado. Ya no se encuentra el polen de las plantas indicadoras de ciénaga ni las zigosporas; aumenta el polen de árboles y gramíneas. Surgen las algas (principalmente diatomeas y *Pediastrum*) y crustáceos planctónicos. Este cambio nos muestra que el lago de Valencia se inició en esta fase y que la vegetación que lo rodeaba era más densa que en la fase anterior. Se halló polen de los géneros arbóreos *Bursera* (tal como el indio desnudo), *Acacia* (cujíes) y *Spodias* (jobos, ciruelos, etc.) y del género herbáceo *Tribulus* (abrojos); todos tienen hoy muchas especies en vegetación semiárida. Esa combinación polínica nos revela que el aumento de densidad se registró, principalmente, con árboles de vegetación seca del tipo espinar-*caatinga*. Las sabanas y los bosques secos ocupaban entonces el piedemonte alrededor del lago en vías de formación. La presencia, en esta fase, de polen de géneros de selva pluvial en muy bajo porcentaje sugiere que comenzó la formación de la selva húmeda en las cimas de las montañas.

A esta fase siguió el establecimiento de los ecosistemas actuales (de 9000 años antes del presente en adelante), que forman un mosaico de sabanas y bosques deciduos alrededor del lago; en las altas montañas vecinas se constituyen en una sucesión altitudinal de bosques deciduos, seguidos de bosques

semideciduos y, finalmente, selva pluvial en las cimas.

El análisis palinológico de los sedimentos puede ser aplicado al estudio paleoecológico y a la detección de cambios climáticos en el pasado geológico, así como también al conocimiento del proceso evolutivo (origen de las plantas y sucesión en el tiempo geológico). Las informaciones resultantes del análisis del polen pueden aplicarse directamente en antropología porque establecen las condiciones ecológicas en que vivía el pueblo en la región. Los cultivos dejan una señal clara en el contenido polínico de un sedimento. No solamente se puede observar, pues, las perturbaciones que la agricultura causó en el ecosistema, sino determinar también el momento en que se inició en la zona.

Merced a la identificación del polen contenido en el aire y la determinación de los días de mayor frecuencia de polen alergénico, se puede programar la prevención de muchas enfermedades alérgicas, verdadero problema clínico. Entre éstas se encuentra la alergia del tipo "fiebre del heno" muy conocida en la América del Norte y Europa. Hay muchas aplicaciones más de la palinología. Citemos, a modo de ejemplo, la bioestratigrafía, que al correlacionar capas geológicas de la misma edad, ofrece su ayuda en la prospección de yacimientos de petróleo.

Las múltiples y variadas aplicaciones del estudio palinológico se basan en la gran diversidad morfológica de los granos de polen y en la estabilidad química de su membrana externa. El análisis palinológico de sedimentos permite la reconstrucción de la vegetación y del clima en el pasado: el polen puede ser transportado a gran distancia y al depositarse en el suelo presenta la vegetación de toda la región. En los lugares en que existen condiciones reductoras, se acumula en capas sucesivas, año tras año. Estas capas estratificadas nos dan la secuencia de la historia de la vegetación de toda la región a través del tiempo. La reconstrucción paleoecológica nos muestra que los ecosistemas, una vez establecidos en una región, no son inmutables. La vegetación está en equilibrio dinámico y responde a los cambios climáticos; la abundancia relativa de sus diferentes elementos cambia y el área de distribución de cada especie vegetal varía en el tiempo. El conocimiento más profundo de la vegetación del pasado y de las sucesiones y cambios ocasionados por modificaciones del medio físico nos da un modelo para el manejo equilibrado de los ecosistemas actuales.

Volcanes submarinos

Nuevas técnicas de exploración del fondo oceánico dibujan un cuadro detallado de los procesos volcánicos responsables del origen de la masa cortical y la génesis de yacimientos minerales

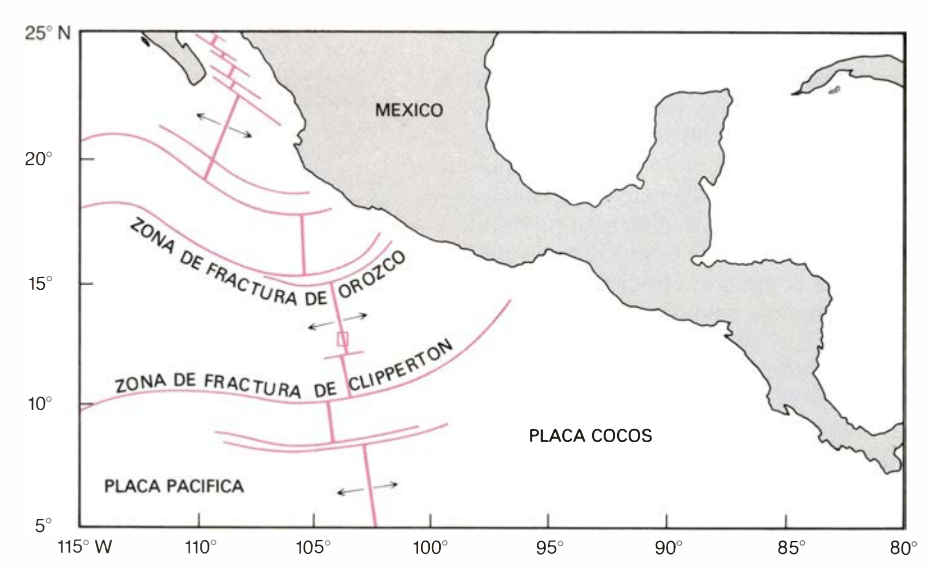
Roger Hékinian

La actividad volcánica que rehace continuamente la superficie de la tierra se produce, casi en su totalidad, en el fondo del océano, muy lejos del alcance de las herramientas tradicionales de investigación del vulcanólogo. El magma, roca fundida, mana del manto y se vierte al fondo del océano en dos zonas características: a lo largo de dorsales mesoceánicas activas, donde las placas tectónicas en expansión crecen por la incesante acreción de material del manto que se solidifica, y en las estructuras volcánicas aisladas llamadas montes submarinos, típicamente extendidos en cadenas por el interior de las placas.

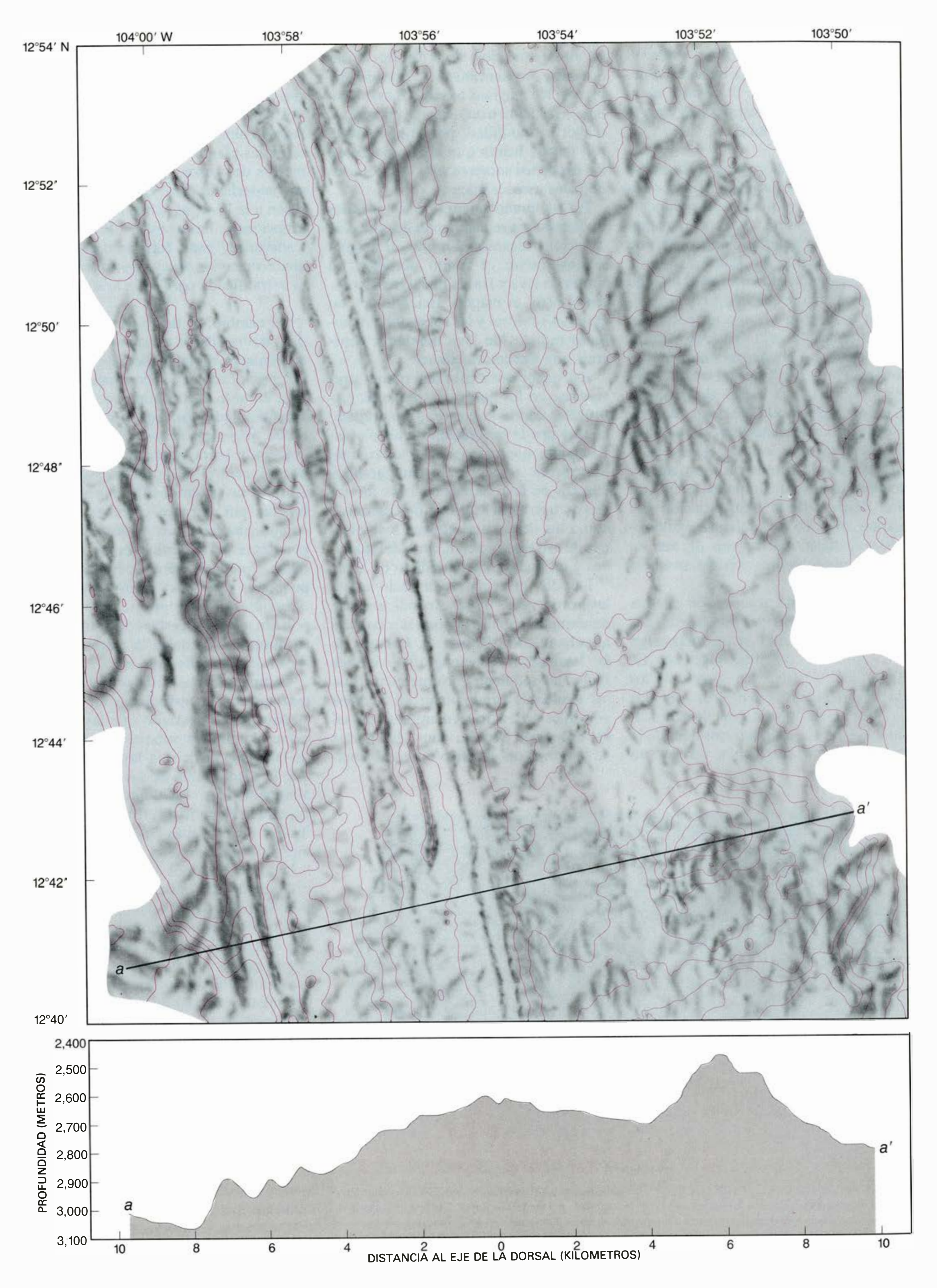
En la última década, los avances en las técnicas de exploración submarina han permitido el estudio detallado de los procesos volcánicos implicados en la creación de corteza oceánica fresca en esos lugares. Los nuevos métodos de la vulcanología submarina abarcan desde la percepción a distancia mediante instrumentos arrastrados desde buques superficiales hasta las observaciones directas "de campo" efectuadas con la ayuda de sumergibles tripulados. El cuadro resultante de este esfuerzo de investigación internacional está lleno de sorpresas. Los nuevos hallazgos prometen un mejor conocimiento de algunos de los más notorios accidentes terrestres, así como el descubrimiento de recursos minerales valiosos y su explotación futura.

De los productos volcánicos, los que más abundan en la superficie terrestre son basaltos: rocas ígneas compuestas principalmente por silicatos de hierro, magnesio, aluminio y calcio. Apoyándose en pruebas sísmicas sobre todo, desde hace tiempo se viene sospechando que el magma basáltico del que están formadas esas rocas se origina en una zona de fusión parcial del manto superior terrestre, a más de 100 kilómetros superficie abajo. A esa profundidad, la roca semifundida es menos densa que el material del manto que la rodea, por lo cual tiende a ascender lentamente hacia la superficie en forma de gotas gigantescas, llamadas diapiros. Al ascender, disminuye la presión del diapiro, de modo que se funde más material del manto. El diapiro que sube contribuye a la formación de las bolsas de magma o columnas de alimentación, relativamente someras, que constituyen la fuente inmediata de actividad volcánica.

Las cámaras de magma más próximas a la superficie son las subyacentes a las dorsales mesoceánicas, donde el grosor de la corteza no alcanza a veces los 10 kilómetros. Si la roca fundida no se extruye inmediatamente, poco a poco se enfría y permanece atrapada por la corteza. Conforme disminuye la temperatura, primero se solidifican minerales de gran densidad y, así, cambia la composición de la mezcla residual. Este proceso de diferenciación, o cristalización fraccionada, lleva a la creación de material cortical heterogéneo. Los minerales de alta densidad, conocidos colectivamente por peridotitas, caen al fondo de la cámara, mientras que los de densidad menor, llamados gabros, revisten las paredes y el techo



1. SEGMENTO DE UNA DORSAL MESOCEANICA DE EXPANSION RAPIDA, ilustrado con un detalle sin precedentes en el mapa de relieve de la página siguiente. El mapa se basa en mediciones de profundidad de gran precisión efectuadas por el SeaBeam, sistema de sonar de bandas múltiples arrastrado por un buque. La prominente estructura diagonal que discurre desde arriba, a la izquierda, hasta abajo, a la derecha, es la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, una zona volcánica activa donde el magma que asciende del manto rezuma sobre el fondo del mar a través de fisuras de la corteza oceánica y se añade a ella. Las fisuras se crean por separación de dos placas tectónicas: la pacífica (*izquierda*) y la Cocos (*derecha*). Los dos volcanes aislados del flanco oriental de la dorsal se formaron sobre el eje de la dorsal; quedaron separados de ella en el curso de la expansión del fondo marino. Este segmento de dorsal, de 30 kilómetros de longitud, queda entre dos grandes fallas transformantes, la zona de fractura de Orozco y la zona de fractura de Clipperton, que cortan transversalmente la dorsal del Pacífico oriental a más de 1000 kilómetros de distancia de la costa de México (*véase el mapa a gran escala de arriba*). Los datos se obtuvieron en un período de tres días durante la expedición de 1981 del buque de investigación francés *Jean Charcot*. El lugar lo exploraron luego de cerca el autor y sus colaboradores en una serie de inmersiones del sumergible tripulado *Cyana*. La equidistancia entre curvas en el mapa de relieve es de 50 metros. La escala vertical está exagerada en el perfil inferior, que corresponde a la línea *a-a'* del mapa.


104°00′ W
103°58′
103°56′
103°54′
103°52′
103°50′
12°54′ N
12°52′
12°50′
12°48′
12°46′
12°44′
12°42′
12°40′
a
a′
PROFUNDIDAD (METROS)
2,400
2,500
2,600
2,700
2,800
2,900
3,000
3,100
10
8
6
4
2
0
2
4
6
8
10
DISTANCIA AL EJE DE LA DORSAL (KILOMETROS)

de la cámara magmática. Parte del magma que no se extruye sobre el fondo oceánico solidifica en los conductos emplazados sobre la cámara magmática y forma unas estructuras alargadas, los llamados diques.

Mientras queda magma en la cámara, su composición fraccionada culmina en la formación de productos más evolucionados: rocas sumamente alejadas de la composición original de la mezcla fundida. La solidificación de los minerales de gran densidad elimina esos componentes de la mezcla, dejando un fluido con mayor concentración de minerales de baja densidad y gases condensados. La mayoría de los basaltos formados tras diferenciación magmática y arrojados luego al fondo del mar son rocas relativamente ácidas, clasificadas como andesitas y traquitas. Las vastas proporciones de gases (principalmente dióxido de carbono, agua y ácido sulfhídrico) atrapados en la fusión después de la diferenciación son responsables de las violentas explosiones volcánicas que se ven de vez en cuando en ambientes marinos someros y en tierra.

Una importante observación relativa al origen de las rocas producidas por volcanes submarinos la efectuaron en 1963 Albert E. J. Engel y Celeste G. Engel, del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Advirtieron que los basaltos hallados en la cima de islas volcánicas y montes submarinos de toda la cuenca pacífica tendían a ofrecer un contenido en álcali más elevado que los basaltos extraídos de la cresta de las dorsales mesoceánicas. Presumiblemente, los magmas basálticos más alcalinos se formaron, en el manto, a mayor profundidad, por lo que sufrieron menos fusión que los formados en los depósitos someros subyacentes a las dorsales mesoceánicas.

En las inmediaciones de las dorsales mesoceánicas se distinguen dos tipos de erupción volcánica. En uno, el magma rezuma sobre el fondo oceánico en forma de lava a través de largas fisuras. En el otro, el magma asciende por un conducto central y las subsiguientes coladas radiales de lava tienden a construir una estructura cónica.

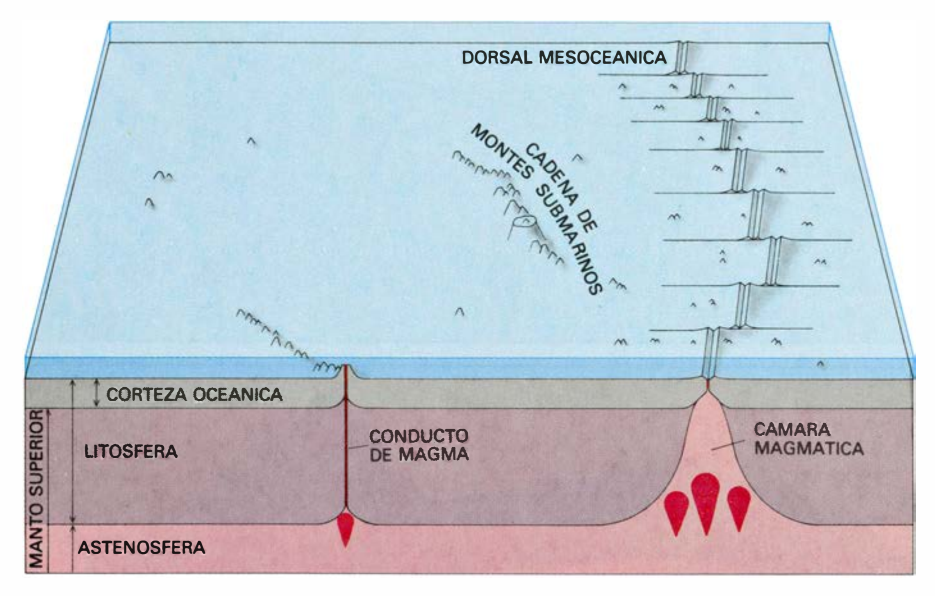
Las erupciones fisurales suelen presentarse en los límites entre placas tectónicas, donde la corteza, quebradiza, se raja por la separación de las placas. El magma que mana a todo lo largo de una fisura tiende a formar grandes charcos de lava parecidos a los formados en tierra por volcanes de "escudo", como los de las islas Hawai; los volcanes de ese tipo suelen tener laderas suaves y un gran cráter inundado de lava.

Las dos principales formaciones de lava observadas en tales condiciones se denominan coladas laminares y coladas almohadilladas. Robert D. Ballard, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, ha señalado recientemente que las laminares predominan en la zona volcánica activa de segmentos de dorsal en expansión rápida, como las partes de la dorsal del Pacífico Oriental situadas frente a la costa de México y cerca de las islas Galápagos, intensamente exploradas en los últimos años por varias expediciones conjuntas de los Estados Unidos, Francia y México. Las coladas laminares de estos lugares presentan lajas planas de menos de 20 centímetros de grosor y formas abombadas con superficies lisas. Las coladas se parecen a la lava pahoehoe asociada a las erupciones hawayanas. En sección transversal, esas formaciones suelen aparecer cavernosas y con una estructura estratificada paralela a la superficie.

En cambio, lo típico de las lavas almohadilladas es su modelo de diaclasamiento radial en sección transversal, provocado por la contracción de la roca durante el enfriamiento. Las lavas almohadilladas suelen encontrarse en zonas volcánicas activas de dorsales de expansión lenta, como la que discurre por el centro del océano Atlántico. Allí, las lavas almohadilladas se caracterizan por formar cerritos, por lo común alargados en el sentido de la pendiente. La superficie de las almohadillas a menudo tiene ondulaciones, o pequeños caballones transversales a la dirección de flujo, que se cree corresponden a fases sucesivas de enfriamiento durante las cuales la fusión seguía fluyendo intermitentemente.

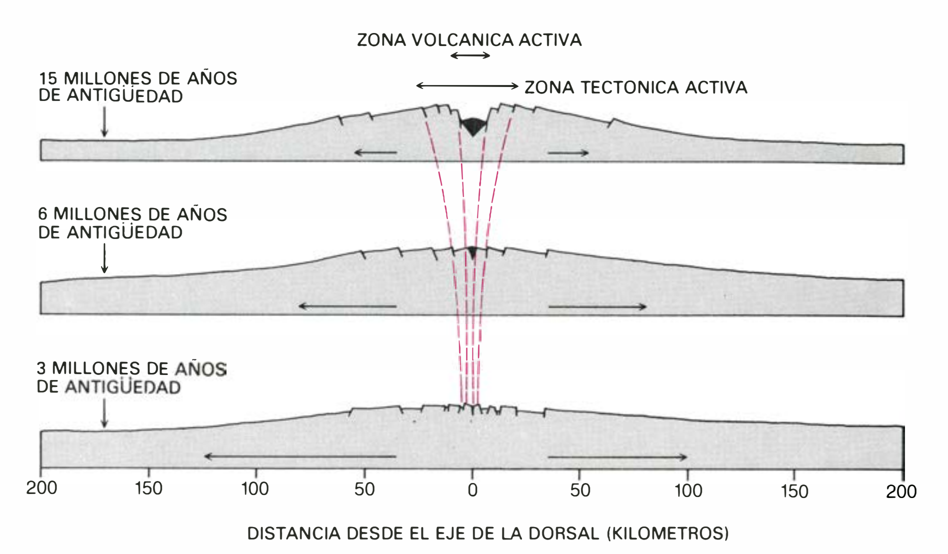
Comparando las coladas de lava submarinas con las estudiadas en Hawai, Ballard ha demostrado que las formaciones laminares submarinas resultan de la erupción de una lava más fluida que la responsable de las formaciones almohadilladas. La fluidez de la lava depende del grado de cristalinidad de la fusión: cuantos más sólidos arrastra la mezcla fundida, tanto menos fluida es la lava. Ambos tipos de colada, laminar y almohadillada, poseen una corteza vítrea formada por el apagamiento de la lava caliente cuando entra en contacto con el agua marina. La corteza es más gruesa en las coladas laminares que en las almohadilladas, porque aquéllas tienen menos cristales que impidan la formación de la capa vítrea. Las observaciones de Ballard sugieren también que las coladas almohadilladas podrían corresponder a una fase eruptiva más tardía que las coladas laminares. Así, una colada laminar producida durante una erupción generalizada de lava caliente muy fluida podría quedar enmascarada por coladas volcánicas subsiguientes, fomentando una formación almohadillada suprayacente.

No se ha descubierto diferencias de composición entre las lavas emitidas en



2. DOS CONTEXTOS DEL FONDO OCEANICO donde tienen lugar erupciones volcánicas se muestran aquí. El magma basáltico que se origina en el manto superior, a más de 100 kilómetros por debajo de la superficie, asciende lentamente en forma de gigantescas gotas llamadas diapiros, que proveen tanto a cámaras magmáticas relativamente someras subyacentes a dorsales mesoceánicas activas (*derecha*) como a las columnas de alimentación de estructuras volcánicas aisladas: los montes submarinos (*izquierda*).

coladas laminares y en coladas almohadilladas, lo que abona la hipótesis de un origen común. Las diferencias en su apariencia externa y estructura interna parecen derivar de sus diferentes mecanismos de erupción. La zona volcánica de más reciente actividad en la parte bien explorada de la dorsal del Pacífico oriental está constituida casi íntegramente por coladas laminares. Acontecimientos volcánicos más antiguos, representados por accidentes topográficos montañosos en los márgenes de estas zonas volcánicas recientes, han dado origen predominantemente a coladas almohadilladas, con sólo restos dispersos de coladas laminares. El hecho de que los segmentos de expansión lenta de la dorsal mesoatlántica tengan una proporción mayor de lavas almohadilladas puede atribuirse a dos causas. Debido a su menor ritmo de expansión, el ascenso de magma es más lento y hay menos magma disponible para extrusión; las erupciones, por tanto, están menos difundidas. Alternativamente, una colada inicial generalizada de lava laminar caliente y fluida puede haber quedado cubierta por coladas almohadilladas posteriores.



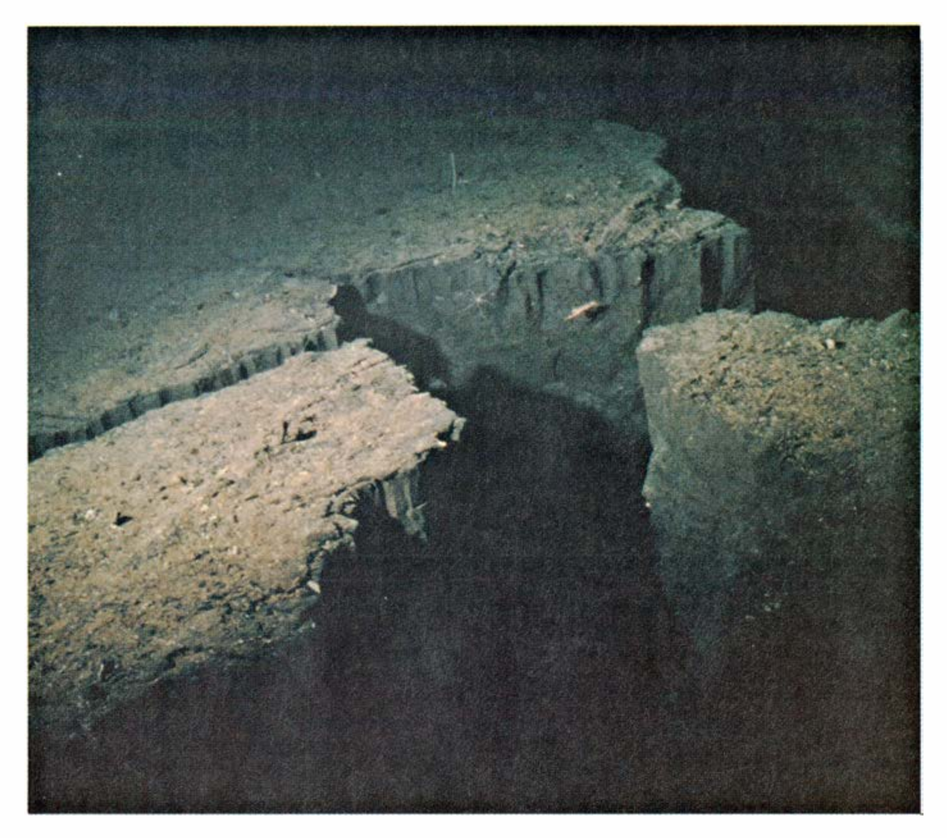
3. LA TASA DE EXPANSION de una dorsal mesoceánica se refleja en su topografía y en la anchura de sus zonas activas volcánicas y tectónicas. Esta representación de tres dorsales con tasas de expansión diferentes se basa en un estudio realizado por el autor en colaboración con Jean Francheteau, del Instituto de Física del Globo de la Universidad de París, y Pierre Choukroune, de la Universidad de Rennes. Los tres perfiles corresponden a un segmento de expansión lenta de la dorsal mesoatlántica (*arriba*) y a dos segmentos de la dorsal del Pacífico oriental; de éstos, el primero es un segmento de expansión intermedia (*centro*) y, el segundo, un segmento de expansión rápida (*abajo*). Se calcula que las tasas de expansión real en los tres lugares son, respectivamente, menos de tres centímetros por año, entre tres y siete centímetros por año y más de siete centímetros anuales. Las dorsales responden de dos maneras al estiramiento de la corteza en el eje, según cómo se alcance el estado de equilibrio isostático: por fisura de ancha expansión cerca del eje, en el caso de la dorsal de expansión rápida, y por movimientos a gran escala de la corteza a lo largo de grandes fallas encaradas al eje, en el caso de las dorsales de expansión intermedia y lenta.

Un rasgo típico de terreno invadido por lava muy fluida es la presencia de estructuras desplomadas. Este fenómeno lo observó por vez primera directamente en el fondo oceánico, en 1978, Jean Francheteau, del Instituto de Física del Globo de la Universidad de París, en el transcurso de una inmersión en el submarino de investigación francés *Cyana*. Los accidentes observados por Francheteau y otros van desde hoyos de pocos centímetros de diámetro hasta charcas de lava de hasta 50 metros de anchura y 20 metros de profundidad. Vista desde el borde, la estructura de una de las mayores estructuras hundidas comprende un conjunto complejo de oquedades caverniformes y lajas de cascajo esparcidas por el fondo oceánico. Se interpreta que tales paisajes son el resultado de varias erupciones que dejaron una sucesión de conductos vacíos por los que la lava se escurría por un plano ligeramente inclinado; los delgados techos de los conductos vacíos se desplomaron luego. Las paredes y los bordes colgados de los conductos elevados suelen presentarse como columnas, algunas de las cuales son huecas, lo que sugiere que el agua marina atrapada entre dos grandes conductos de lava se abrió vía hacia la superficie dejando pasos solidificados. O quizá quedara agua marina atrapada bajo los conductos de lava; el agua, caliente, se abriría paso a través de la lava fundida, creando sus propios trayectos verticales, cuyos restos se nos muestran hoy como columnas.

El tipo más centralizado de erupción volcánica puede o no ir asociado a una fisuración generalizada de la corteza oceánica. Tal acontecimiento tiene lugar cuando el magma ascendente se concentra en conductos relativamente angostos que conducen a las principales columnas alimentadoras de estructuras volcánicas elevadas. Algunos montes submarinos, por ejemplo, pueden ir asociados a fisuras extendidas a lo largo de las cuales manó magma por un conducto principal, apilando sucesivamente coladas de lava una encima de otra. (El término monte submarino lo definió en sentido amplio –sin referencia a la cuestión del origen– Henry W. Menard, Jr., de la Institución Scripps de Oceanografía, como cualquier elevación aislada del fondo oceánico de sección transversal horizontal, circular o elíptica, y una pendiente de entre cinco y 35 grados de arco con respecto al terreno adyacente.)

La cima de un monte submarino a veces tiene un cráter, o área deprimida, del que mana lava. Los cráteres de más de dos kilómetros de diámetro se consideran calderas. Las depresiones de ese tipo tienen profundidades de entre 50 y 300 metros y suelen estar limitadas por zonas de fallas verticales. Las depresiones se forman cuando la cámara magmática queda vacía y desaparece el apoyo que impide el desplome del techo del cono volcánico. Thomas E. Simkin, de la Institución Smithsoniana, ha sugerido que podrían producirse erupciones submarinas a partir de grietas de alimentación a lo largo de las fallas verticales de la circunferencia de una de esas calderas. Las coladas de lava de esos "conductos anulares" llegarían a llenar la caldera y a aplanar la cima del volcán. Los montes submarinos de cima plana conocidos como guyots, que suelen hallarse lejos de las dorsales mesoceánicas, quizá se formaran así. Otros volcanes submarinos en vez de caldera hundida coronan su cima de varios picos, cuya altura oscila entre unos 20 y 100 metros y cuya pendiente es más empinada que la del volcán principal. (Estas generalizaciones se apoyan principalmente en observaciones submarinas efectuadas cerca del eje de la dorsal del Pacífico oriental, en las inmediaciones de las islas Galápagos.)

A menudo se han observado coladas laminares con aspecto de lajas vítreas formadas durante la fluencia de lava muy fluida, cuya corteza se rompió durante el enfriamiento. Este tipo de colada recuerda el fenómeno de la "loma de presión", habitual en los volcanes



4. **FISURA DEL FONDO OCEANICO en la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, a unos 13 grados de latitud norte, causada por la rápida expansión de dos placas tectónicas en esa región. A través de esas fisuras se producen erupciones volcánicas que alimentan la expansión del fondo. Las fotografías en color que ilustran este artículo las tomaron miembros de la expedición francesa en inmersiones en el *Cyana*.**

5. **LAVA ALMOHADILLADA, generalmente asociada a erupciones volcánicas menos fluidas, que a menudo toma la forma de tubos alargados por donde se canaliza la roca fundida a través del fondo.**

hawayanos. Otros accidentes volcánicos submarinos corrientes son pequeñas cúpulas de lava constituidas por una acumulación de vidrios basálticos aciculares; las cúpulas, semejantes a los "conos de escorias volcanicas" formados durante erupciones volcánicas en tierra, aparecieron al ascender lava caliente a través de grietas a lo largo de la ruta principal de una colada de lava subyacente.

La presencia de estructuras superpuestas en la cima de muchos volcanes submarinos indica que varias erupciones contribuyen a la formación de un mismo volcán. En los montes submarinos se encuentra una amplia variedad de coladas de lava; las predominantes –coladas laminares y coladas almohadilladas– recuerdan las observadas en las dorsales mesoceánicas. Es habitual encontrar almohadillas tubiformes en las laderas de picos volcánicos, donde coladas laminares y grandes coladas horizontales de formas levemente abovedades tienden a rellenar las depresiones. En las cimas de los montes submarinos también se observan a veces coladas piroclásticas, restos fragmentados de explosiones volcánicas ocurridas a profundidades de menos de 200 metros.

El empleo de nuevos instrumentos, como el SeaBeam, un sistema de sonar de bandas múltiples arrastrado en profundidad que fabrica la General Instrument Corporation, ha permitido efectuar estudios topográficos extraordinariamente detallados de las dorsales mesoceánicas y de otras estructuras volcánicas submarinas. El SeaBeam levanta un mapa batimétrico de gran precisión del fondo oceánico a lo largo del trayecto del barco que lo arrastra. La técnica permite cartografiar vastas extensiones del fondo oceánico en un tiempo relativamente breve. Por ejemplo, durante la expedición de 1981 del buque de investigación francés *Jean Charcot* se cartografió una extensión de fondo marino de 600 kilómetros cuadrados de la dorsal del Pacífico oriental en sólo tres días [*véase la figura 1*].

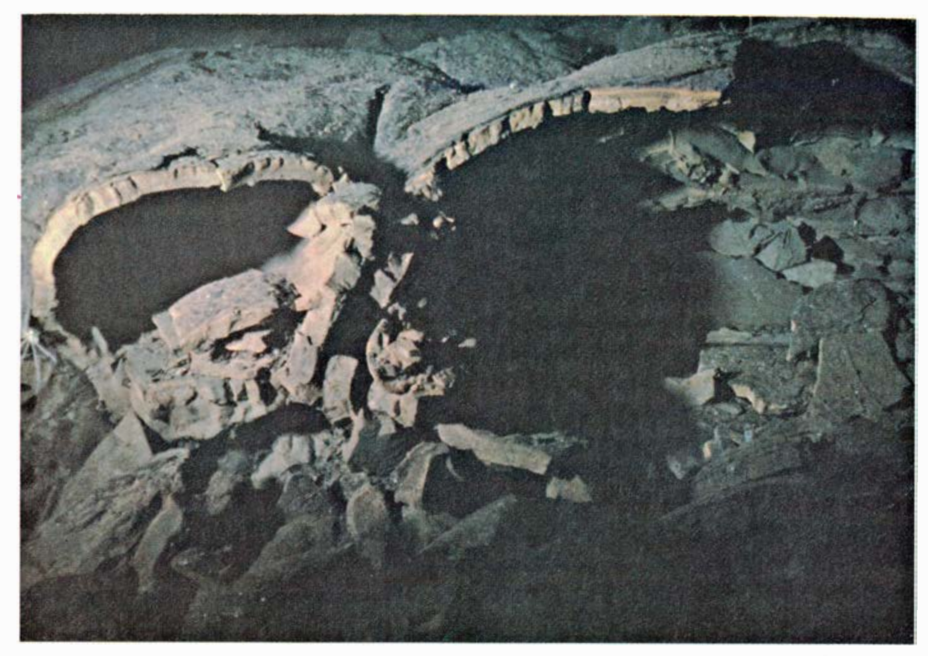
En estos últimos años, ha registrado también un progreso considerable el uso de sumergibles tripulados, en particular el *Cyana* y el norteamericano *Alvin*, que posibilitan los estudios directos del fondo oceánico en las dorsales mesoceánicas. El grupo francés, del que soy miembro, se ha basado en observaciones efectuadas con la ayuda del *Cyana* para comparar accidentes tectónicos de dorsales de tres tasas de expansión diferentes: baja (menos de 3

centímetros por año), media (entre 3 y 7 centímetros anuales) y rápida (más de 7 centímetros por año). Hemos visitado dorsales de los tres tipos en el sumergible para acometer observaciones visuales directas de los accidentes tectónicos y volcánicos asociados al proceso de expansión del fondo marino en condiciones diversas.

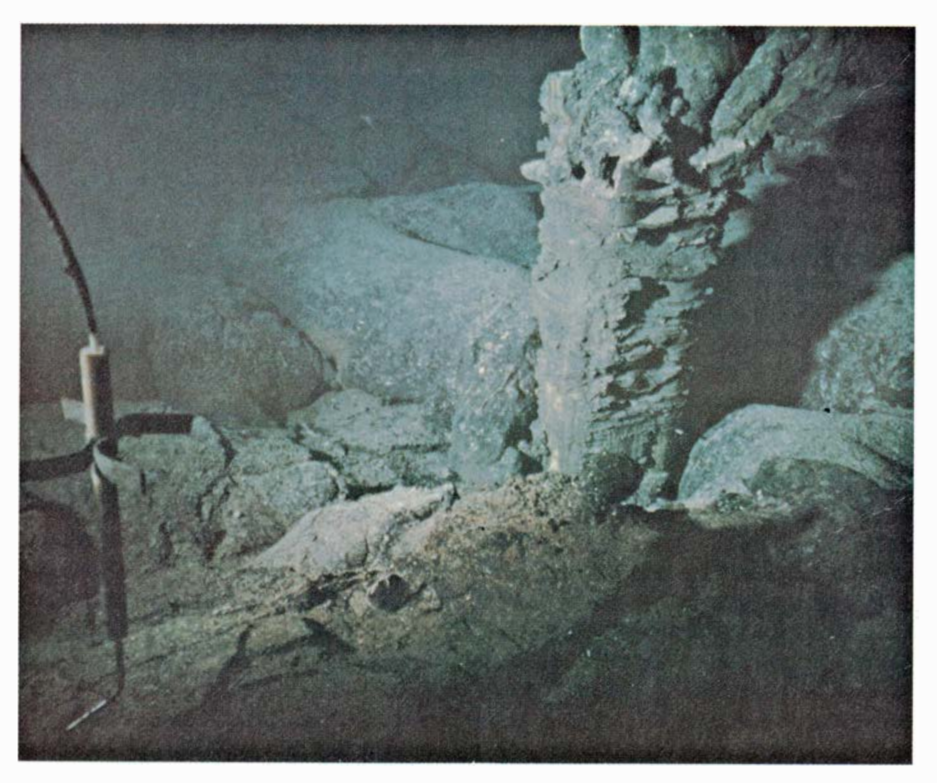
La zona tectónica activa de una dorsal de expansión rápida suele ser muy angosta: menos de 6 kilómetros de anchura, por término medio. Lo que puede atribuirse al efecto del calor de la cámara magmática somera sobre la corteza suprayacente. La región axial de una dorsal de expansión rápida tiende a estar caliente y a ofrecer una topografía de "*horst* y *graben*", donde la corteza se rompe en bloques alternantes levantados (horsts) y hundidos (grabens) por movimientos reiterados a lo largo de fallas verticales. Las dorsales de expansión lenta tienden a ser frías y a quedar limitadas por pares opuestos de escarpes, riscos abruptos, encarados hacia dentro.

La diferencia puede atribuirse al modo en que cada tipo de dorsal alcanza un estado de equilibrio isostático, en el cual las estructuras se hunden o flotan según su densidad. El equilibrio isostático se alcanza por doquier, a través y a lo largo de un sistema de dorsal de expansión rápida, mediante la fisura frecuente de la corteza caliente; pero ninguna dorsal de expansión lenta pasa inicialmente al equilibrio de esa manera. Por el contrario, el equilibrio se restablece cerca del eje de una dorsal de expansión lenta por movimientos verticales esporádicos de gran escala a lo largo de grandes fallas. La presencia de un valle de fractura central, una región deprimida de más de 1000 metros de profundidad en una dorsal de expansión lenta como la del centro del Atlántico, es el resultado de un ajuste vertical a gran escala de la corteza, en respuesta a la necesidad de restablecer el equilibrio isostático. A lo largo de una dorsal de expansión rápida no hay valle de fractura central, por cuanto el equilibrio isostático se logra inicialmente en incrementos menores.

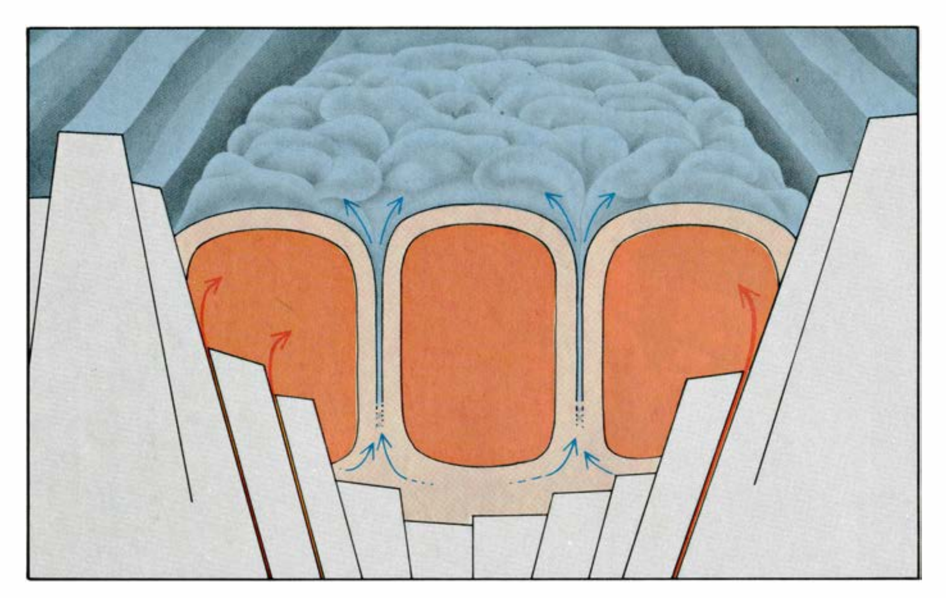
Las largas fisuras a través de las cuales mana magma en una dorsal mesoceánica tienden a orientarse perpendicularmente a la dirección de expansión. Bajo las fisuras, el magma se canaliza a lo largo del eje de la dorsal, y cuando se extruye a través de la corteza agrietada da origen a un paisaje de relieve bastante bajo. Las estructuras volcánicas formadas en las dorsales mesoceánicas o sus inmediaciones pueden convertirse en picos aislados al alejarse del eje de la dorsal durante la expansión del fondo marino. Conforme se aleja del borde de acreción de placa, la corteza se enfría y engrosa. Este proceso puede influir en la altura alcanzada por esos volcanes a medida que se alejan del eje, ya que la corteza más gruesa puede soportar sobre su superficie una masa mayor. Pero un volcán formado en la dorsal no puede aumentar su masa, a menos que siga teniendo una fuente de magma cuando ha abandonado la parte de emanación de la zona axial. A veces, un volcán formado en una dorsal mesoceánica puede convertirse en una isla, pero sólo si una cámara magmática o



6. FORMAS ABOLLADAS HUECAS, indicadoras de la erupción de un lava muy fluida. Las caracteriza una superficie lisa, una gruesa corteza vítrea y una estructura en capas paralela a la superficie. En este caso, parte de la formación volcánica se hundió tras drenarse la lava, revelando la cavidad interna.



7. ESTRUCTURA COLUMNAR (*derecha*), supuesto residuo de una charca de lava desplomada que quedó parcialmente enterrada por coladas de lava posteriores. A la izquierda se ve un termómetro.







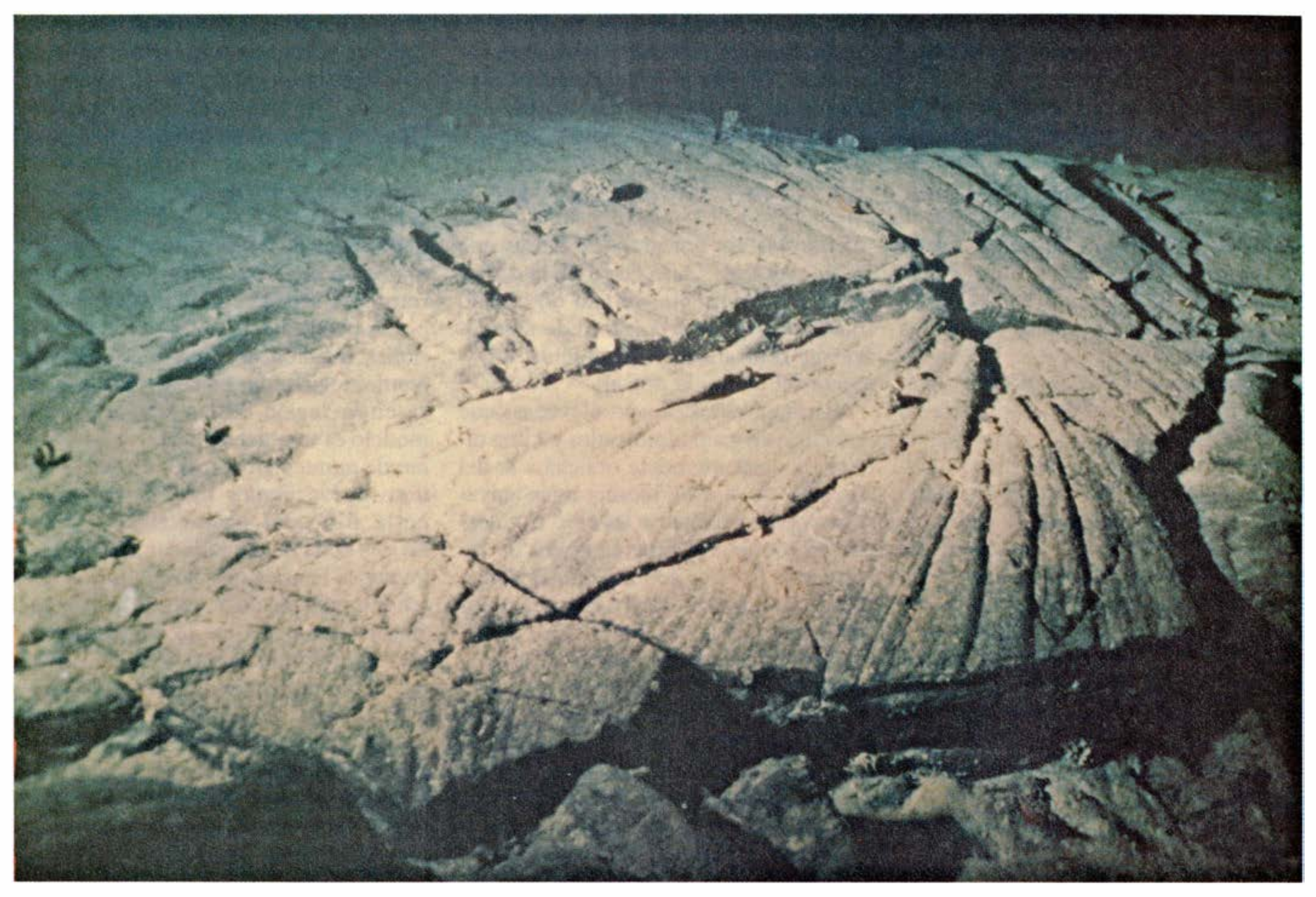
8. FORMACION DE COLUMNAS. Quizá se levantaran al drenarse la lava muy fluida de la charca, provocando el desplome del delgado techo de la formación y creando una gran hoya. Según esta reconstrucción de la posible secuencia de acontecimientos, las columnas, algunas de las cuales alcanzan hasta 15 metros de altura, constituyen los restos de conductos solidificados por los que escapaba el agua marina atrapada debajo de la lava. Formaciones de esta clase las observaron por vez primera, en 1978, Francheteau y sus colaboradores en la cresta de la dorsal del Pacífico oriental, a unos 21 grados de latitud norte. La ilustración se basa en esquemas de Claude Rangin, de la Universidad Pierre et Marie Curie, de París.

una columna alimentadora subyacentes le suministran magma.

Hace más de un siglo que se conoce la existencia de volcanes submarinos aislados; se descubrieron en los sondeos efectuados durante la expedición alrededor del mundo del H.M.S. *Challenger*, de 1872 a 1876. Sin embargo, hubo que esperar a 1964 para que Menard completara la primera exploración generalizada de los montes submarinos pacíficos. Que el Pacífico tenga una densidad de montes submarinos mucho mayor que los océanos Atlántico o Indico concuerda con la suposición de que la corteza oceánica del Pacífico ha desarrollado más actividad volcánica que la corteza oceánica subyacente a los demás océanos.

Los datos batimétricos (esto es, de profundidades del océano) disponibles relativos a la distribución de volcanes submarinos en la cuenca pacífica los analizó recientemente Rodey Batiza, de la Universidad de Washington en St. Louis. Basando su estudio en el registro geológico de inversiones del campo magnético terrestre, Batiza dividió el Pacífico en bandas cuyas edades van de la actualidad (en el eje de la dorsal del Pacífico oriental) hasta el período Cretácico (hace entre 65 y 136 millones de años). Demostró que el número de volcanes por unidad de área crecía con la edad cortical, alcanzando un máximo en el Eoceno (hace entre 37 y 55 millones de años). El análisis de Batiza indica que el volumen de lava presente en forma de montes submarinos también aumenta con la edad de la corteza; según este patrón, la actividad volcánica fue máxima a principios del Cretácico, hace más de 100 millones de años. Este hallazgo corrobora la observación de que los montes más altos, que se elevan por encima de los 4 kilómetros sobre el fondo oceánico, se hallan en el Pacífico occidental cerca de la fosa de Filipinas, donde la corteza supera los 100 millones de años.

En fechas recientes se ha descubierto muchos volcanes submarinos con la ayuda de un sistema de sonar de visión lateral llamado GLORIA, desarrollado en el Instituto de Ciencias Oceanográficas de Wormley, Inglaterra. El GLORIA se arrastra unido a un buque de investigación muy cerca de la superficie; proporciona un cubrimiento de una escala extraordinariamente grande del fondo oceánico, explorando una faja de entre 36 y 50 kilómetros de anchura en un solo barrido. En 1980, un grupo de oceanógrafos británicos encabezados



9. LAVA LAMINAR fotografiada desde el *Cyana*, en la cima del monte submarino Clipperton, a 18 kilómetros al oeste del eje de la dorsal del Pacífico oriental. La formación de lava de estas características es parecida a las que produce la erupción de lava muy fluida de volcanes "de escudo" en tierra.

por Roger C. Searle, con sólo dos pasadas con el GLORIA en el Pacífico sudoriental, entre la dorsal del Pacífico oriental y la costa de Sudámerica, descubrieron unos 200 volcanes de más de un kilómetro de diámetro de base.

A lo largo de la ruta de 3300 kilómetros recorrida en los dos trayectos se apreció que la densidad de los volcanes variaba notoriamente con la edad de la corteza oceánica. Se encontró una densidad máxima de más de 50 volcanes por 10.000 kilómetros cuadrados en una faja de corteza de la época miocena (hace entre 6,5 y 26 millones de años) que se extiende a una distancia de entre 700 y 1700 kilómetros del eje de la dorsal del Pacífico oriental. Un máximo algo menor en la distribución de densidades se observó a unos 200 kilómetros de la dorsal. Searle calcula que la densidad media de volcanes en el Pacífico sur ronda los 8 por 10.000 kilómetros cuadrados, cifra algo mayor que la estimada por Batiza para el Pacífico norte: entre dos y cinco volcanes por 10.000 kilómetros cuadrados.

La variación en la densidad de volcanes de un lugar a otro sugiere que, además de los aislados que se originan en la dorsal mesoceánica, existen varios volcanes intraplaca verdaderos, es decir, volcanes que ascienden en la propia placa tectónica y no en los bordes entre dos de ellas. Uno de los mecanismos considerados responsables de este tipo de vulcanismo se basa en la teoría del "punto caliente" propuesta por W. Jason Morgan, de la Universidad de Princeton. Sostiene Morgan que el vulcanismo intraplaca puede desarrollarse allí donde un ascenso de material caliente del manto se eleva hasta la superficie mientras la placa tectónica va pasando sobre una zona de fusión parcial fija del manto superior.

Resulta difícil distinguir un volcán formado en el interior de una placa tectónica de otro creado en una dorsal mesoceánica, porque es poca la información pormenorizada que de la mayoría de volcanes submarinos se posee. Para distinguir los volcanes construidos en la dorsal de los creados por vulcanismo intraplacas, Anthony B. Watts y John H. Bodine, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, acaban de medir el efecto de carga sobre la placa en las inmediaciones de islas y montes submarinos de la cuenca pacífica. La corteza oceánica sufre una tensión cuando se le añade una carga topográfica, de ahí que la capa exterior de la tierra deba alcanzar un nuevo equilibrio subiendo o bajando. En respuesta a una carga prolongada la corteza se dobla; así, cuando se añade un volumen de lava a una determinada región de la corteza oceánica, la corteza se deforma. La redistribución de masa debida a la carga genera una anomalía de gravedad, que pueden medir los instrumentos transportados en barcos, aviones o satélites. A partir del análisis de mediciones de anomalías gravitatorias, Watts y N. M. Ribe, de la Universidd de Chicago, han llegado a la conclusión de que el vulcanismo intraplaca fue muy intenso en el período Cretácico; ello, desde luego, corresponde a la época en que hizo erupción el mayor volumen de lava. De sus datos batimétricos y de anomalías de la gravedad Watts y Ribe dedujeron también que el vulcanismo provocado por la actividad de la dorsal mesoceánica ha sido más

intenso que el vulcanismo intraplaca sobre corteza de menos de 100 millones de años.

Peter F. Lonsdale y Fred N. Spiess, de Scripps, han propuesto un modelo del desarrollo de un volcán conforme se aleja del eje de una dorsal mesoceánica. Un volcán de alimentación central, sugieren, empieza a formarse en el eje de la dorsal durante el vulcanismo central iniciado sobre conductos alimentadores principales provistos de magma del manto superior. Al crecer la corteza, el volcán se aleja de la zona axial. Cuando se ha apartado lo suficiente (más de 15 kilómetros) abandona la vertical de la columna principal de alimentación. En esa situación, sólo puede desarrollarse un cono volcánico alto cuando el volcán se alimenta de otra fuente de magma que ascienda directamente del manto superior. Lonsdale y Spiess han identificado dos estructuras volcánicas simétricas, de más de 1000 metros de altura sobre el fondo oceánico, a 35 kilómetros a cada lado de la dorsal del Pacífico oriental; en su opinión se formó un solo volcán en el eje de la dorsal, que se dividió en dos estructuras por expansión del fondo del mar.

Montes submarinos partidos de más de 600 metros de altura se han encontrado recientemente en pleno eje del sistema de dorsal de Juan de Fuca, en el Pacífico nororiental. El monte submarino dividido se había dejado ver ya en un mapa batimétrico levantado por un equipo de investigadores estadounidenses y canadientes dirigido por H. Paul Johnson, de la Universidad de Washington. El volcán estaba claramente partido por grandes fisuras que lo atravesaban. A lo largo de la dorsal del Pacífico oriental se han observado también pequeños volcanes de alimentación central, inmediatamente adyacentes al eje de la dorsal.

Estructuras volcánicas elevadas, que constituyen grupos alineados en una dirección aparentemente oblicua a la del sistema de dorsal mesoceánica adyacente, probablemente las creó el vulcanismo intraplaca. Hay ejemplos de estructuras lineales con accidentes volcánicos de alimentación central en los flancos de la dorsal del Pacífico oriental, a unos nueve grados norte, y en la dorsal de Juan de Fuca, a unos 46 grados norte. Las cadenas de montes submarinos empiezan en el eje de la dorsal o cerca de él y se extienden por lo menos unos centenares de kilómetros en una dirección noroccidental, generalmente oblicua, a diferencia de la orientación septentrional del eje principal de la dorsal mesoceánica.

No se comprende bien cuál pueda ser el mecanismo que determina que estas cadenas de montes submarinos oblicuas se extiendan a partir de un borde de acreción de placa. En 1977, Richard N. Hey, de Princeton, propuso que tales estructuras oblicuas se formaban en una región donde el eje de dorsal está desencajado lateralmente por una pequeña zona de fractura de modo que un segmento de dorsal se propaga y el otro retrocede. Hey llegó a esa conclusión por la presencia de un patrón de inversiones magnéticas, orientado oblicuamente, registradas en la corteza oceánica en la región de los Galápagos. Su modelo es también aplicable a las cadenas de montes submarinos observadas a unos nueve grados norte y 46 grados norte, formadas, aparentemente, cuando una zona de debilidad quedó afectada por la fisura generalizada que se extendía, gran distancia, desde la orientación principal del eje de expansión de la dorsal. El alineamiento de las cadenas de montes submarinos puede mostrar la dirección preferente de la placa móvil, siempre que se admita que los puntos calientes que alimentan los volcanes sucesivos se mantienen fijos en el manto superior mientras las placas tectónicas resbalan sobre ellos.

Una vez formada la corteza oceánica, bien sea por vulcanismo central que genera volcanes aislados, bien durante la acreción de dorsales mesoceánicas normales, queda sujeta a alteración. Uno de los principales procesos que alteran la corteza oceánica tiene que ver con los cambios mineralógicos y químicos que provoca la interacción entre agua marina y la corteza. Los factores que intervienen de manera principal en ese proceso son la circulación profunda de agua marina a través de fisuras y fallas y el calor liberado durante la solidificación magmática. Recientemente, John M. Edmond y Karen Von Damm, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, resumieron los cambios de composición provocados por la circulación de agua marina a través de las rocas de la corteza oceánica [véase "Fuentes termales en el fondo del océano", por John M. Edmond y Karen Von Damm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1983].

Pruebas directas de corteza oceánica joven alterada por circulación hidrotermal se lograron recientemente durante inmersiones del *Cyana* en el eje de la dorsal del Pacífico oriental. Al pie de un escarpe de falla en cuya cima se observó una grieta hidrotermal extinguida se extrajeron rocas verdes constituidas

10. MONTICULO DE LAVA, reminiscencia de un flujo almohadillado irradiado pendiente abajo, presumiblemente formado cuando lava caliente ascendió por una grieta del techo de una colada subyacente. Esta estructura la volvemos a encontrar en la cima del monte submarino Clipperton, en el Pacífico.



11. GRAN VOLCAN SUBMARINO descubierto en el transcurso de una exploración con sonar del fondo oceánico entre la dorsal del Pacífico oriental y la costa de Perú, efectuada durante el crucero de 1980 del buque de investigación británico *Discovery*. La imagen de sonar se obtuvo mediante un sistema de sonar de visión lateral llamado GLORIA, desarrollado en el Instituto de Ciencias Oceanográficas de Wormley, Inglaterra. El volcán, uno de los mayores de los 200 montes submarinos encontrados en la exploración, mide 1,5 kilómetros de altura y alcanza los 9,5 kilómetros de anchura en la base.

por clorita (un silicato hidratado) y arcillas asociadas a plagioclasa fresca (un silicato calcosódico). Descubrimientos parecidos se efectuaron a lo largo de la cresta de la dorsal del Pacífico oriental en el Pacífico meridional durante una expedición oceanográfica dirigida por la Preussag AG, una compañía minera de Alemania Occidental.

Conforme prosigue la alteración de la corteza oceánica con la transformación de las principales fases minerales, la subsiguiente liberación de hidrógeno, ácido clorhídrico y ácido silícico modifica la composición del agua marina, volviéndola más corrosiva. El fluido hidrotermal también lixivia y transporta, durante la convección a alta temperatura, iones de carga positiva de metales como manganeso, cinc, cobre y cobalto, constituyentes traza de las rocas basálticas. Los metales traza se depositan en el fondo marino en forma de precipitados de sulfuro. Si el contenido en cobre y cinc del basalto oceánico fresco es, respectivamente, de menos de 100 y 150 partes por millón, cuando los metales se transportan y precipitan como sulfuros su concentración ha aumentado más de 10.000 veces.

Se calcula que para producir un depósito de sulfuro de tres metros cúbicos con un 50 por ciento de cinc había de procesarse unos 1500 metros cúbicos de basalto con un contenido en cinc de 100 partes por millón. Otros constituyentes menores de los depósitos de sulfuros son cobalto y plata, presentes en minerales como pirita, calcopirita y blenda. El contenido en plata de alguno de los sulfuros analizados llega a 385 partes por millón, lo que corresponde a un enriquecimiento de 5000 veces respecto de su concentración en el basalto original.

Algunos yacimientos hidrotermales emergidos, como los de Chipre, se explotaron hasta mediados de este siglo para extraer plata y oro. No puede pasarse por alto la importancia económica del hidrotermalismo del fondo oceánico. Los yacimientos hidrotermales conocidos del mundo quizá tengan la antigüedad de las porciones más viejas de la corteza terrestre: algunos de ellos se han explotado desde los albores de la civilización. En galerías subterráneas de las minas de cobre de Chipre se ha encontrado instrumentos de minería anteriores al 2500 a. de C. La mayoría de los yacimientos explotables del escudo canadiense se formaron en la era Paleozoica, hace unos 500 millones de años, y en el período Terciario, hace entre 20 y 25 millones de años. Se supone que muchos de los yacimientos nacieron en antiguas dorsales mesoceánicas. Las formaciones de sulfuros de Omán representan depósitos hidrotermales probablemente acumulados en estructuras submarinas elevadas y asociadas a erupciones volcánicas del período Terciario.

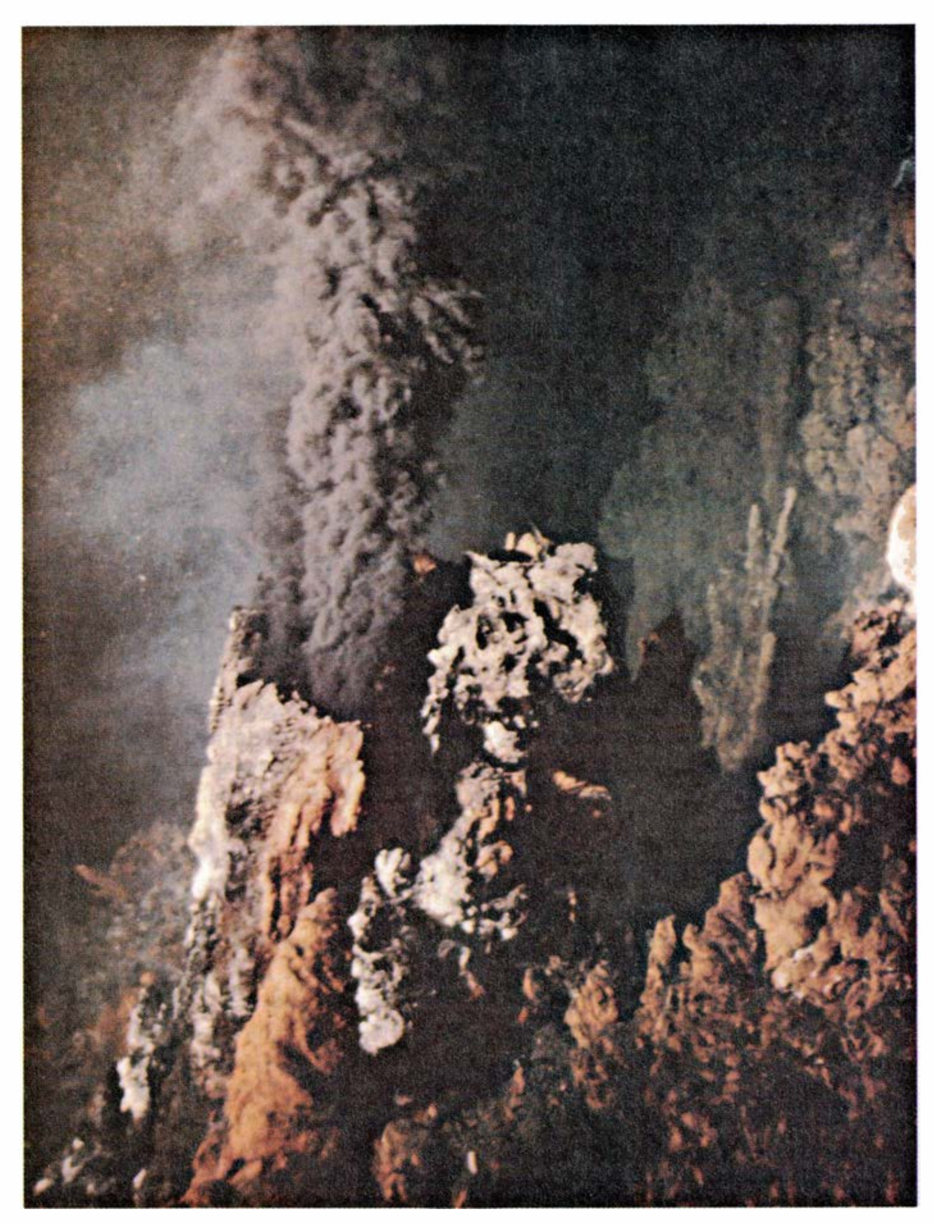
La exploración de sistemas de dorsal de expansión rápida con el dispositivo SeaBeam, generalmente junto con una cámara de profundidad, permitió a nuestro grupo obtener en 1981 información valiosa acerca de la distribución de depósitos hidrotermales a ambos lados del eje de la dorsal del Pacífico oriental. En un segmento de 20 kilómetros de longitud de la depresión central, que mide menos de 600 metros de anchura y 50 metros de profundidad, hay más de 84 puntos hidrotermales. Seis meses después, investigadores que se sumergieron en el mismo lugar con el *Cyana* encontraron que, de los 84 puntos hidrotermales, por lo menos 24 desarrollaban una intensa actividad. Este segmento de la dorsal del Pacífico oriental se considera la región hidrotermal más activa hasta hoy descubierta en el fondo oceánico. Por término medio los depósitos hidrotermales llegan a los 50 metros de diámetro. Constan de varias estructuras columnares que alcanzan hasta 27 metros de altura, coronadas por varias chimeneas hidrotermales activas menores. Los depósitos hidrotermales suelen contener principalmente sulfuros de cobre, cinc y hierro, con una pequeña mezcla de sílice hidratada y anhidrita.

Mediciones de temperatura del fluido caliente emitido dieron valores próximos a los 330 grados Celsius. Los fluidos negros se arrojan de las chimeneas a una velocidad de entre medio metro y 2 metros por segundo. Se calculó que el flujo de un humero con un diámetro de tres centímetros era de entre 3,5 y 14 litros por segundo. Las tasas de flujo más altas son las de los fluidos negros cargados con abundantes iones metálicos. Se calculó que su concentración rebasaba los 0,1 gramos por litro. Un solo humero con un flujo de 10 litros por segundo a esa concentración produciría una masa total de 100 kilogramos de metal por día. Tan considerable descarga de metal en agua marina no es un proceso continuo; se cree que los hu-

meros tienen una vida relativamente breve. La mayoría de los materiales hidrotermales descargados en el eje de la dorsal no precipitan en las inmediaciones, sino que se dispersan por doquier, contribuyendo a la formación de los sedimentos metalíferos y nódulos de hierro y manganeso comunes sobre corteza oceánica vieja a cierta distancia del eje de expansión.

No sólo se ha observado actividad hidrotermal en dorsales mesoceánicas normales, sino también en estructuras volcánicas elevadas. En 1983, geólogos canadienses y estadounidenses dirigidos por Richard L. Chase, de la Universidad de Columbia Británica, a bordo del sumergible canadiense *Pisces IV*, descendieron a la caldera de un monte submarino del eje de expansión de la dorsal de Juan de Fuca, a una profundidad de casi 1600 metros; descubrieron grietas hidrotermales calientes y grandes estructuras sulfurosas de unos 10 metros de altura y tres o cuatro metros de diámetro. Lonsdale, Batiza y Simkin exploraron en 1982 otros montes submarinos situados fuera de la dorsal; hallaron depósitos activos de sulfuros en la caldera de un volcán a 18 kilómetros del eje de la dorsal del Pacífico oriental.

Coincidiendo con las inmersiones de científicos estadounidenses en los montes submarinos distantes del eje en una parte de la dorsal del Pacífico oriental, científicos franceses exploraban montes submarinos de la cresta de la dorsal en un lugar situado a unos 900 kilómetros al sur. Identificaron grandes depósitos hidrotermales en un pequeño monte submarino situado cerca de seis kilómetros al este del eje de la dorsal, a unos 13 grados norte. (Es el que aparece abajo, a la derecha, en el mapa mayor de la figura 1.) La cima y el flanco meridional del volcán de 400 metros se exploraron con una cámara arrastrada en profundidad y con el *Cyana*. La base del monte submarino queda a 2675 metros de profundidad y tiene un diámetro de seis kilómetros; la estructura culmina en una cima de menos de 500 metros de diámetro, a una profundidad de 2440 metros. En una de las inmersiones, subiendo de la base del monte submarino a su cima, mis colegas y yo vimos indicios de estructuras sedimentarias, volcánicas e hidrotermales. La base del monte submarino está cubierta por un delgado manto de sedimento en sus primeros 500 metros, aproximadamente. Ascendiendo por el flanco sur se apreciaban grandes depósitos hidrotermales que cubrían alrededor del 80 por ciento de la superficie, extendidos casi continuamente hasta la cima del monte submarino. En ocasiones se observó que esporádicas coladas almohadilladas tubulares habían enterrado parcialmente los productos hidrotermales. Así lo indicaba la abundancia localizada de lava almohadillada sobre sulfuros y sedimentos cerca de la cima del monte submarino. El depósito hidrotermal es un producto alterado, constituido principalmente por hidróxido de hierro que corona un depósito macizo de mineral de hierro que aflora en algunos lugares. La ausencia de sedimento en la cima e inmediaciones y el frescor de la lava indicaban actividad volcánica e hidrotermal durante una descarga reciente de fluidos calientes.



12. DEPOSITOS DE SULFUROS RICOS EN METALES rodean una grieta hidrotermal activa del tipo "humero negro" en esta fotografía tomada en 1982 desde el *Cyana* en la zona axial de la dorsal del Pacífico oriental, a 13 grados de latitud norte. También se ha observado actividad hidrotermal en estructuras volcánicas elevadas. Los hallazgos del grupo del autor inducen a considerar los montes submarinos posibles lugares de privilegio para la formación de yacimientos minerales por lixiviación hidrotermal.

Observaciones de campo directas prueban que los depósitos hidrotermales de ese pequeño monte submarino alcanzan por lo menos los 800 metros de longitud y 200 de anchura a lo largo de la singladura seguida por el sumergible. Una primera aproximación indica que el depósito tiene un volumen de material 10 veces mayor que la suma de todos los depósitos de sulfuros distribuidos a lo largo del segmento de 20 kilómetros del eje adyacente de la dorsal del Pacífico oriental. Una exploración ulterior de la región, en febrero de este año, parece confirmar que los montes submarinos son lugares privilegiados para la formación de yacimientos minerales.

Inmunotoxinas

Se pretende unir un agente tóxico a un anticuerpo monoclonal específico de un antígeno tumoral y fabricar un "proyectil mágico" que destruya células cancerosas sin dañar las normales

R. John Collier y Donald A. Kaplan

¿Cómo destruir parte de las células de un enfermo sin afectar al resto? Ese difícil objetivo persigue la quimioterapia del cáncer y de otras enfermedades. Una célula cancerosa es una célula normal alterada. Libre del control a que suele estar sometido su crecimiento, se multiplica rápidamente. El cáncer invade tejidos vecinos y puede, por metástasis, alcanzar tejidos más distantes. La mayoría de los agentes quimioterapéuticos que utilizan los oncólogos son drogas que afectan preferentemente a células que se dividen con rapidez. Por desgracia, nos hallamos ante un tratamiento poco selectivo. Las células normales no están a salvo de los efectos de esas drogas. Las dosis necesarias para eliminar las células cancerosas pueden resultar letales para el enfermo, e incluso dosis moderadas pueden provocar una amplia gama de efectos laterales nocivos.

Queda otra forma de atacar el problema: un "proyectil mágico" que destruya las células alteradas y deje intactas las demás. Los antibióticos son un ejemplo de proyectil mágico. Un antibiótico puede matar bacterias o impedir su proliferación, sin riesgos para las células humanas, ya que inhibe exclusivamente procesos metabólicos específicos de las células bacterianas, que son procariotas. Obtener agentes tóxicos contra enfermedades debidas a hongos o parásitos con un grado de selectividad comparable es más difícil, ya que el metabolismo de las células eucariotas que las producen es muy parecido al de las células de mamífero infectadas.

Otro tipo de proyectil mágico sería aquel que pudiésemos dirigir hacia una diana establecida, por ejemplo, un cierto tipo de célula cancerosa. El agente sería tóxico *per se* para la mayoría de las células, pero sólo se le permitiría acceder a una población definida de ellas. Los avances habidos en la pasada década en inmunología celular, el desarrollo de los anticuerpos monoclonales y el buen conocimiento de ciertas sustancias naturales altamente tóxicas hacen factible esta nueva aproximación. Se trata de una estrategia sencilla, al menos en principio: desarrollar un anticuerpo monoclonal que se una específicamente a cierto tipo de células y no a las demás, y acoplar dicho anticuerpo a una molécula tóxica. El combinado anticuerpo-toxina, también llamado inmunotoxina, debería matar las células "diana", pero no el resto, y debería lograrlo con una alta eficacia. En la práctica, como veremos, hay dificultades para utilizar esta aproximación, y todavía queda un largo camino por recorrer antes de que las inmunotoxinas lleguen a convertirse en un agente terapéutico de uso común. Sin embargo, varios investigadores han demostrado ya la capacidad de las inmunotoxinas para matar selectivamente células en un cultivo de laboratorio; se ha avanzado un paso más: se están realizando pruebas con animales.

La capa lipídica de la membrana de la célula está cubierta por cientos de estructuras químicas (fundamentalmente proteínas, algunas de las cuales llevan unidas cadenas de carbohidratos) que desempeñan diferentes papeles en el metabolismo y la comunicación celular. Muchas de esas estructuras difieren de una especie a otra y de un individuo a otro dentro de la misma especie. Incluso en un mismo individuo, muchas de ellas difieren de un tipo celular a otro. Resulta especialmente interesante que algunas estructuras de la superficie celular sean típicas de ciertas células malignas, lo que permite distinguirlas de las células normales incluso dentro de un mismo tejido.

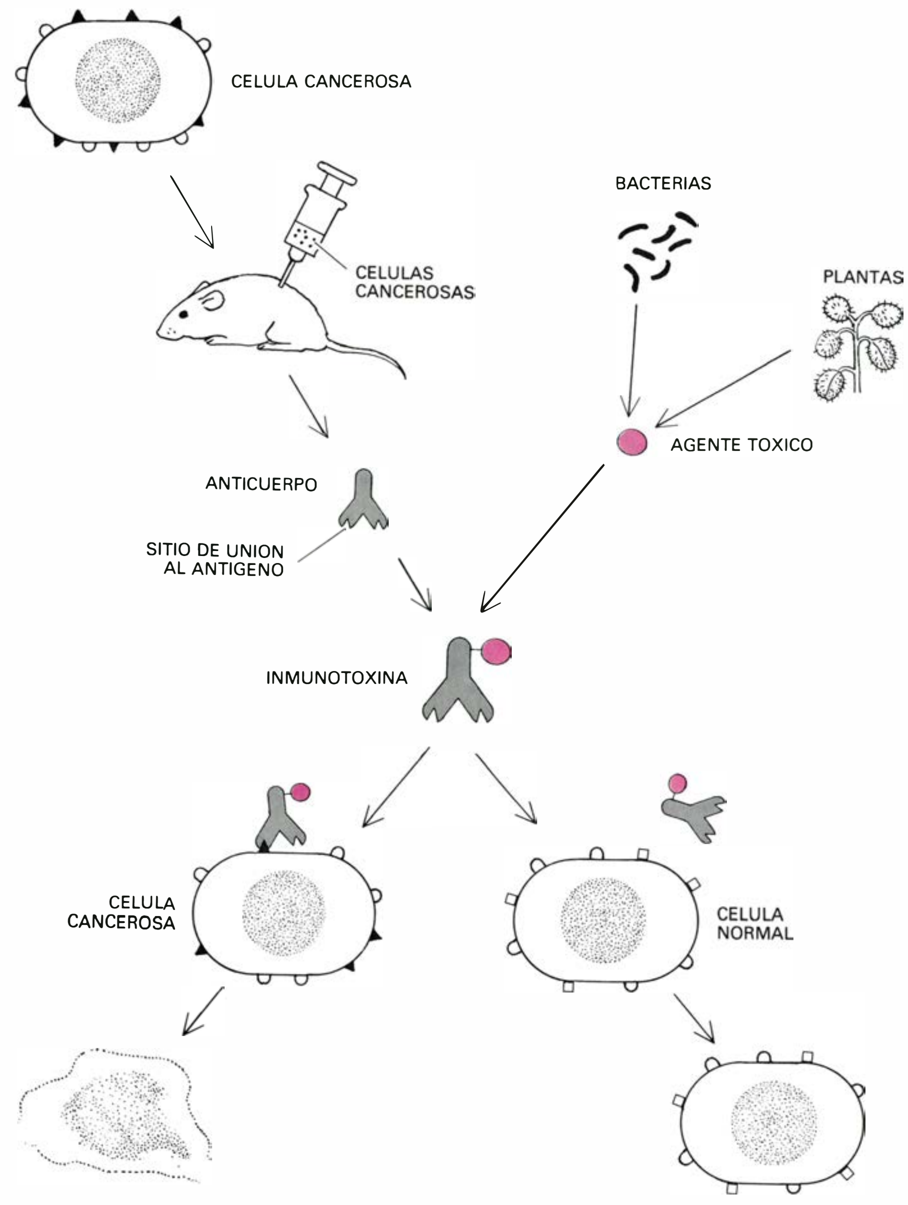
Cuando se introducen células humanas dentro del cuerpo de un animal, los marcadores de la superficie celular que difieren de los que posee el propio receptor se consideran extraños. Desempeñan, por tanto, el papel de antígenos: el sistema inmune del animal responde a su presencia fabricando anticuerpos contra ellos. Los anticuerpos son moléculas de proteínas altamente específicas que pueden reconocer y unirse fuertemente a los antígenos que indujeron su síntesis. La función natural de tales anticuerpos es iniciar los procesos de defensa que inactivan o destruyen las sustancias extrañas perjudiciales, aunque durante mucho tiempo los investigadores han explotado el carácter específico de los anticuerpos para buscar, identificar, marcar y separar ciertas células o moléculas. Los anticuerpos "provocados" por un cierto tipo de células humanas sirven para distinguir esas células de otras. De hecho, ya a principios de este siglo, el bacteriólogo e inmunólogo alemán Paul Ehrlich sugirió que los anticuerpos podrían utilizarse para enviar agentes tóxicos químicamente unidos a ellos hacia determinadas células.

Durante muchos años, la idea no pudo ponerse en práctica. Hasta hace poco tiempo, y debido a lo difícil que resulta purificarlos a partir de una mezcla de anticuerpos del suero de un animal inmunizado, sólo se podían obtener cantidades muy pequeñas de anticuerpos que reaccionaran específicamente con un único antígeno y, por tanto, que se uniesen con garantía a un solo tipo de células. Cada anticuerpo específico lo sintetizan y excretan células plasmáticas procedentes de un clon de linfocitos *B* dedicado a la síntesis de dicho anticuerpo, pero no había forma de propagar dicho clon, pues no se sabía cómo cultivar in vitro las células que excretan anticuerpos.

El problema se solucionó gracias al desarrollo, en 1975, de la técnica de los hibridomas, ideada por Cesar Milstein, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge. Milstein encontró la forma de fusionar linfocitos *B* con células similares, aunque procedentes de un



1. ANTICUERPOS MONOCLONALES que reconocen células cancerosas, en un corte congelado de un carcinoma de mama. Los anticuerpos se unen de forma específica a un antígeno asociado con el tumor, una molécula característica de las células cancerosas ubicada en su superficie. Se distinguen los anticuerpos gracias a la técnica indirecta de la inmunoperoxidasa, que tiñe de marrón la superficie de las células cancerosas cubiertas por anticuerpos; los núcleos de las células normales y cancerosas presentan un color azul claro. La preparación de anticuerpos y la fotomicrografía se realizaron en el laboratorio de Arthur E. Frankel, de la Compañía Cetus. Anticuerpos monoclonales como éstos son los que se utilizan, uniéndolos con agentes tóxicos, para fabricar inmunotoxinas, compuestos capaces de unirse específicamente a células cancerosas y destruirlas, dejando intactas las normales, a las que no se unen.



2. LA NOCION DE INMUNOTOXINA no encierra mayor complejidad: se inyectan en un ratón células cancerosas, que, entre las moléculas que llevan en su superficie, cuentan con un antígeno específico del tumor (*negro*). El ratón sintetiza anticuerpos contra el antígeno. Se empalma al anticuerpo una sustancia tóxica, procedente de una bacteria o cualquier otra fuente, y se obtiene la inmunotoxina. Esta se une al antígeno específico del tumor, presente en las células cancerosas, y las mata (*abajo, a la izquierda*). No reconoce los antígenos de las células normales (*abajo, a la derecha*), que no resultan dañadas por la toxina.

mieloma maligno. Los hibridomas resultantes se asemejan a las células *B* en que cada uno de ellos produce un solo tipo de anticuerpo, y a las células del mieloma en que pueden cultivarse indefinidamente. Los hibridomas se multiplican en clones de células idénticas, que pueden aprovecharse como fuente continua de un anticuerpo "monoclonal" contra un antígeno específico.

Para aislar un anticuerpo monoclonal específico de un cierto tipo celular debe inocularse en ratones de laboratorio un cultivo puro de células o una preparación de sus membranas celulares (que son las que llevan los antígenos de superficie). Se aíslan las células *B* del animal y se fusionan con células de mieloma, y entre los hibridomas resultantes se buscan los que producen anticuerpos monoclonales capaces de unirse a las células diana cultivadas, o bien a sus membranas, e incapaces de unirse eficazmente a una colección de células o membranas de control. Rara vez la especificidad de unión de los anticuerpos monoclonales es absoluta, aunque puede ser extraordinariamente alta, debido en parte a que el antígeno reconocido por el anticuerpo es mucho más abundante en la superficie de las células diana que en el resto.

Antes de disponerse de anticuerpos monoclonales contra antígenos de superficie se había estudiado ya las propiedades de los agentes tóxicos que pueden enviarse con los anticuerpos para matar células cancerosas. Existen varios candidatos: drogas tóxicas, como las que suelen utilizarse en la quimioterapia del cáncer, según mencionamos antes; isótopos radiactivos de varios elementos, algunos de los cuales tienen una afinidad por determinados tejidos (como el yodo por la glándula tiroides), y proteínas tóxicas de origen natural, producidas por ciertas bacterias, plantas y animales.

Todos los candidatos se han unido a anticuerpos y se han sometido a ensayo, aunque la mayor parte del trabajo sobre inmunotoxinas se ha invertido en proteínas tóxicas de origen natural. Algunas de ellas se cuentan entre las más potentes sustancias citocidales (destructoras de células) conocidas. En condiciones adecuadas, una célula humana puede destruirse con una sola molécula de la toxina excretada por *Corynebacterium diphtheriae*, el agente causante de la difteria, o de la proteína ricina, que se encuentra en el ricino. Nuestro grupo ha trabajado principalmente con la toxina de la difteria.

La toxina es una enzima que inactiva un componente esencial de la maquinaria de síntesis de proteínas de las células no bacterianas. Cataliza la transferencia del ribodifosfato de adenosina, una parte del transportador de electrones adenín nicotinamida dinucleótido (NAD), a una proteína denominada factor de elongación 2 (EF-2). El factor es necesario para sintetizar proteínas en los orgánulos celulares denominados ribosomas; se inactiva una vez que se le adosa el grupo ADP-ribosa. En un día, aproximadamente, una sola molécula de la toxina de la difteria es capaz de inactivar, si no todas, la mayoría de los dos millones de moléculas de EF-2 que existen en una célula animal típica. Incapaz de fabricar proteínas, la célula muere.

La mayoría de las proteínas tóxicas probablemente actúen de forma similar: una sola molécula de toxina inactiva sucesivamente múltiples moléculas diana. Por ejemplo, Sjur Olsnes, Alexander A. Pihl y sus colegas, del Instituto para la Investigación del Cáncer de Norsk Hydro, Oslo, han demostrado que la ricina y otras toxinas de plantas parecidas también inactivan los ribosomas tras un proceso enzimático (aunque diferente del que sigue la toxina de la difteria).

Toxinas tan potentes como las descritas parecen ideales para unirlas a anticuerpos y fabricar una inmunotoxina eficaz. Sin embargo, existe un proble-

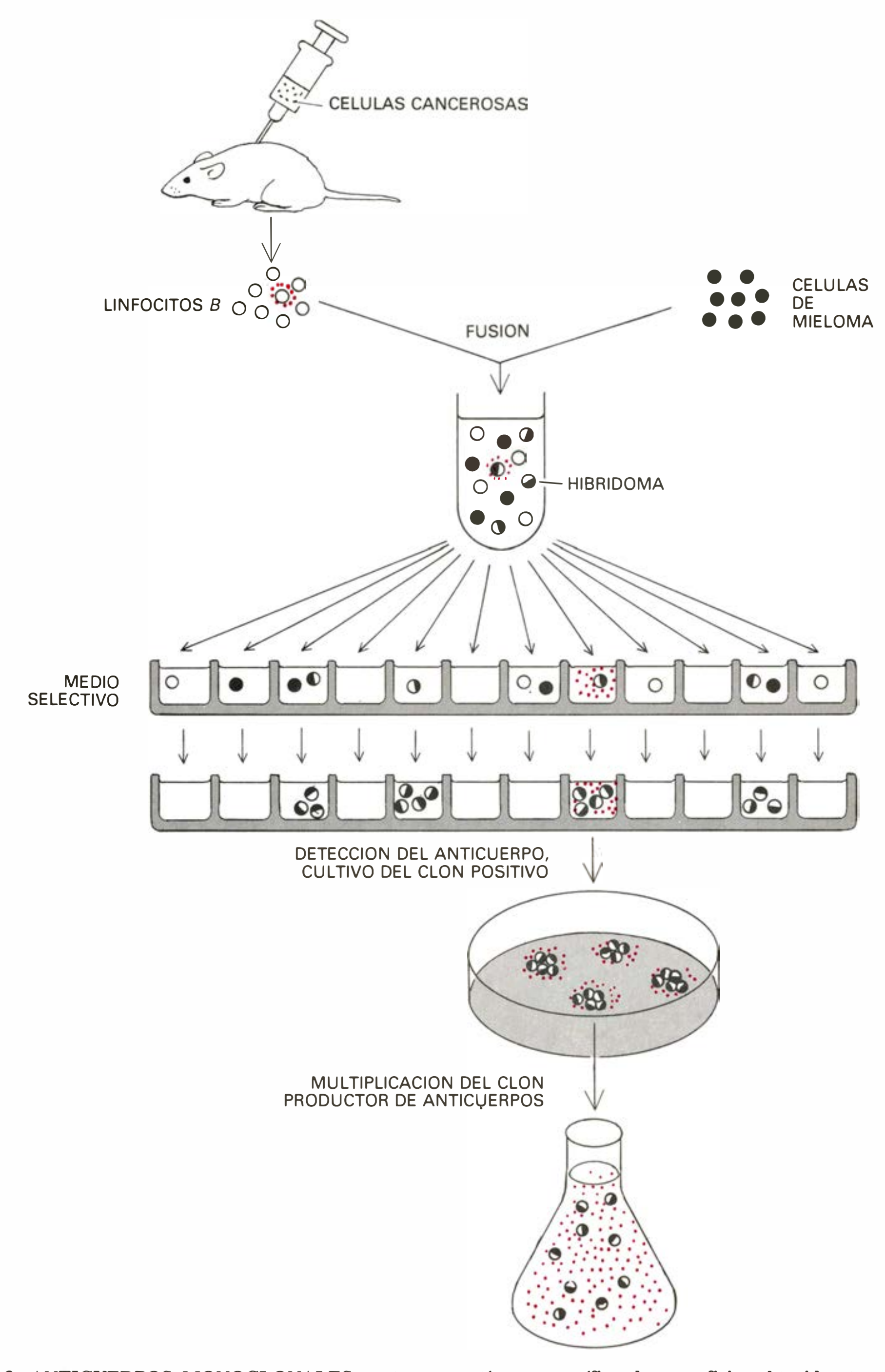
ma grave. Una molécula de toxina posee puntos mediante los cuales puede unirse a la mayoría de las células de mamífero. Una inmunotoxina fabricada por mera unión de una molécula de toxina a un anticuerpo conserva esa capacidad de unión inespecífica. Tendrá afinidad no sólo por las células diana reconocidas por el anticuerpo, sino también por casi cualquier tipo de célula y, por tanto, matará las células normales y las cancerosas con pareja eficacia. Obviamente, era preciso eliminar de alguna forma esa afinidad de la toxina por las células y hacerla depender del anticuerpo al que se unía.

Se vislumbró un método a partir de los detallados estudios sobre la estructura de las proteínas tóxicas, realizados a principios de los años setenta. Uno de los autores (Collier), junto con sus colegas de la Universidad de California en Los Angeles y D. Michael Gill, Alwin M. Pappenheimer, Jr. y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, observaron que la molécula intacta de la toxina de la difteria no catalizaba la adición de la ADP-ribosa al EF-2. La actividad enzimática se detectaba sólo si la toxina se había cortado primero en dos partes desiguales. Para ello, en primer lugar, la cadena polipeptídica de la toxina se seccionaba en dos cadenas menores, gracias a la acción de una proteasa (una enzima que corta proteínas). Posteriormente se rompía un puente disulfuro que enlazaba ambas cadenas. (Un puente disulfuro es un enlace químico entre dos átomos de azufre, cada uno de los cuales está unido a su vez a una cadena polipeptídica.)

La más corta de las dos cadenas resultantes, la cadena *A*, se probó responsable de la actividad enzimática de la toxina. Una cadena *A* separada de la *B*, la más larga, inactivaba a EF-2 en extractos celulares. Se comprobó que la cadena *B* era la responsable de la unión entre la toxina y los receptores de la superficie celular. Por sí sola, ninguna de las cadenas era tóxica en células intactas, señal de que tanto la unión al receptor como la adición de la ADP-ribosa eran indispensables para el proceso tóxico normal. La ricina y otras toxinas derivadas de plantas tenían características similares. Estas toxinas están formadas por dos cadenas unidas por puentes disulfuro: una cadena, la *A*, con actividad enzimática, y la otra, la *B*, responsable de la unión de la toxina a la superficie celular.

Estos descubrimientos sugirieron a algunos investigadores la posibilidad de unir solamente la cadena *A* al anticuerpo con especificidad por un tipo celular, con lo que quedaría eliminada la capacidad de unión al receptor de la propia toxina. De esta forma, el anticuerpo sería el único que se uniría a la superficie celular y sólo se eliminarían las células diana. Además, puesto que la cadena *A* por sí sola carecía de toxicidad (al ser incapaz de unirse a las células), cualquier rotura fortuita de la inmunotoxina en sus dos componentes (la cadena *A* y el anticuerpo), dentro del cuerpo sería inocua, ya que no se producirían agentes tóxicos inespecíficos.

Las dos cadenas de las toxinas con que trabajábamos estaban unidas por puentes disulfuro; cabía, pues, esperar que la cadena *A* pudiera empalmarse al anticuerpo de la misma forma. Los puentes disulfuro se rompen con facilidad en las células; ello facilitaría la libe-



3. ANTICUERPOS MONOCLONALES contra un antígeno específico de superficie, obtenidos tras inyectar células en un ratón, recolectar los linfocitos *B* (leucocitos especializados en la síntesis de anticuerpos) del animal inmunizado y fusionarlos con células de mieloma. Las células fusionadas, denominadas hibridomas, se reconocen por su capacidad para sobrevivir y dividirse en un medio selectivo. Al igual que los mielomas, son inmortales, lo que permite mantenerlos indefinidamente en el laboratorio. Algunos de los hibridomas excretan el anticuerpo deseado (*color*), detectable en el medio. Cuando un cultivo da positivo, se siembra para aislar colonias: un clon de células que fabrican el anticuerpo. Del clon se obtienen grandes cantidades de células, que constituyen una fuente permanente del anticuerpo monoclonal.

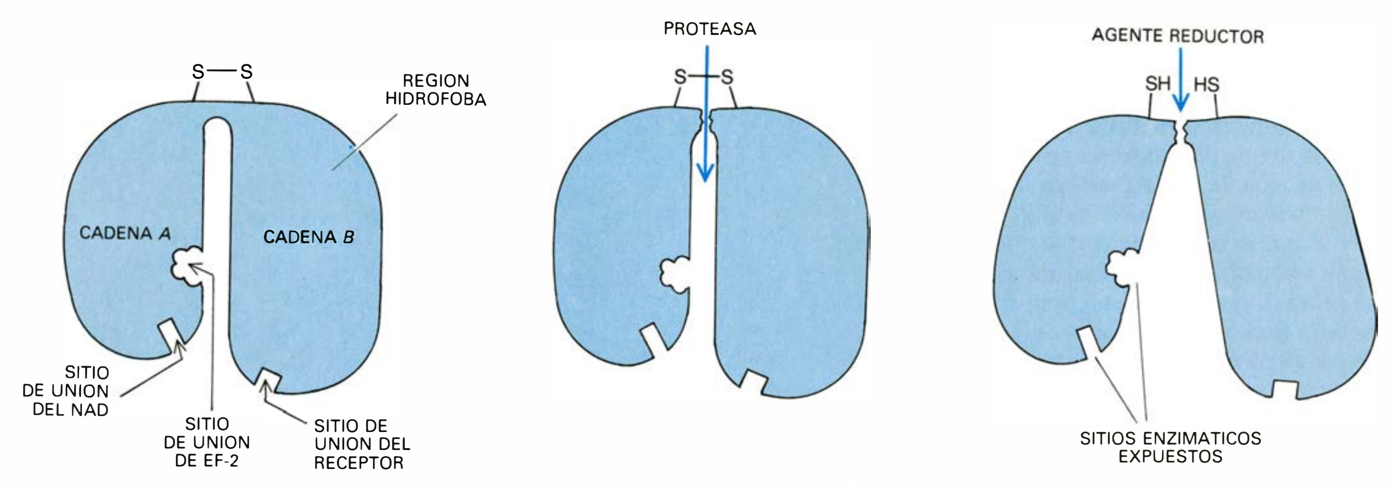
ración de la cadena *A* dentro de una célula diana y, por tanto, la activación de la cadena al quedar expuesto su sitio enzimático.

Por entonces no se disponía de anticuerpos monoclonales dirigidos contra células específicas. Varios grupos empezaron a ensayar la viabilidad de la idea uniendo cadenas *A* a hormonas o lectinas. Las hormonas se unen a receptores específicos de la superficie celular; las lectinas, que son proteínas vegetales no tóxicas, se unen con gran facilidad a varias glicoproteínas y glicolípidos de la superficie celular. David M. Neville, Jr., y sus colegas, del Instituto Nacional de la Salud Mental, lograron por primera vez la unión de una cadena *A* de toxina a una hormona.

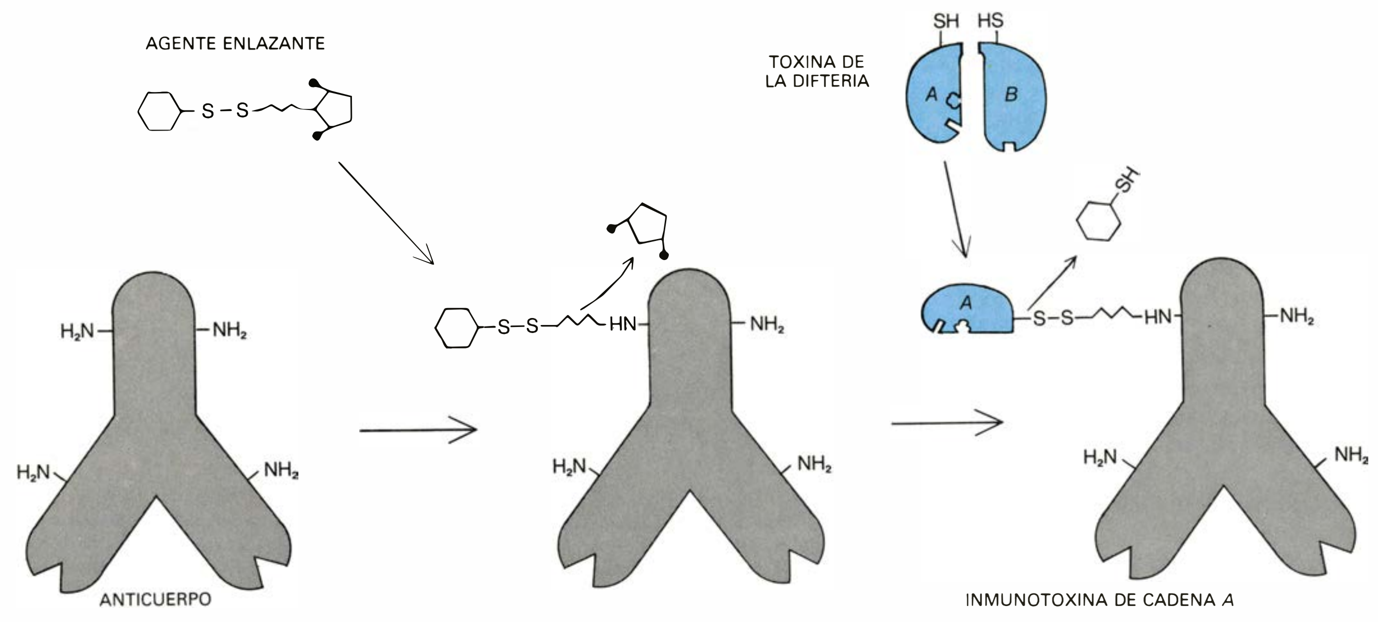
En la Universidad de California en Los Angeles (UCLA), D. Gary Gilliland y uno de los autores (Collier) unieron la cadena *A* de la toxina de la

TOXINA DE LA DIFTERIA
EF-2
EF-2
P P
NAD
ADP-RIBOSA
NICOTINAMIDA

4. TOXINA DE LA DIFTERIA, que inactiva el factor de elongación número 2 (EF-2), un componente esencial de la maquinaria de síntesis de proteínas. La toxina realiza esta acción catalizando la transferencia al EF-2 del ribodifosfato de adenosina, que forma parte del transportador de electrones dinucleótido de nicotinamida y adenina (NAD). Una molécula de la toxina de la difteria inactiva la dotación completa de EF-2 de una célula en un día.



5. ACTIVIDAD ENZIMATICA se observa sólo cuando la molécula de toxina (*izquierda*) se ha seccionado en dos cadenas. La más pequeña, cadena *A*, porta el sitio o punto enzimático que cataliza la transferencia del ADP-ribosa al EF-2. La cadena *B* lleva el sitio responsable de la unión al receptor, además de una región hidrófoba que le permite insertarse en las membranas biológicas. Se obtienen inmunotoxinas que no se unan a células inapropiadas empleando sólo la cadena *A*. Las cadenas se separan cortando el puente proteico tendido entre ambas (*centro*) y otro disulfuro (*S-S*) que las une (*derecha*).



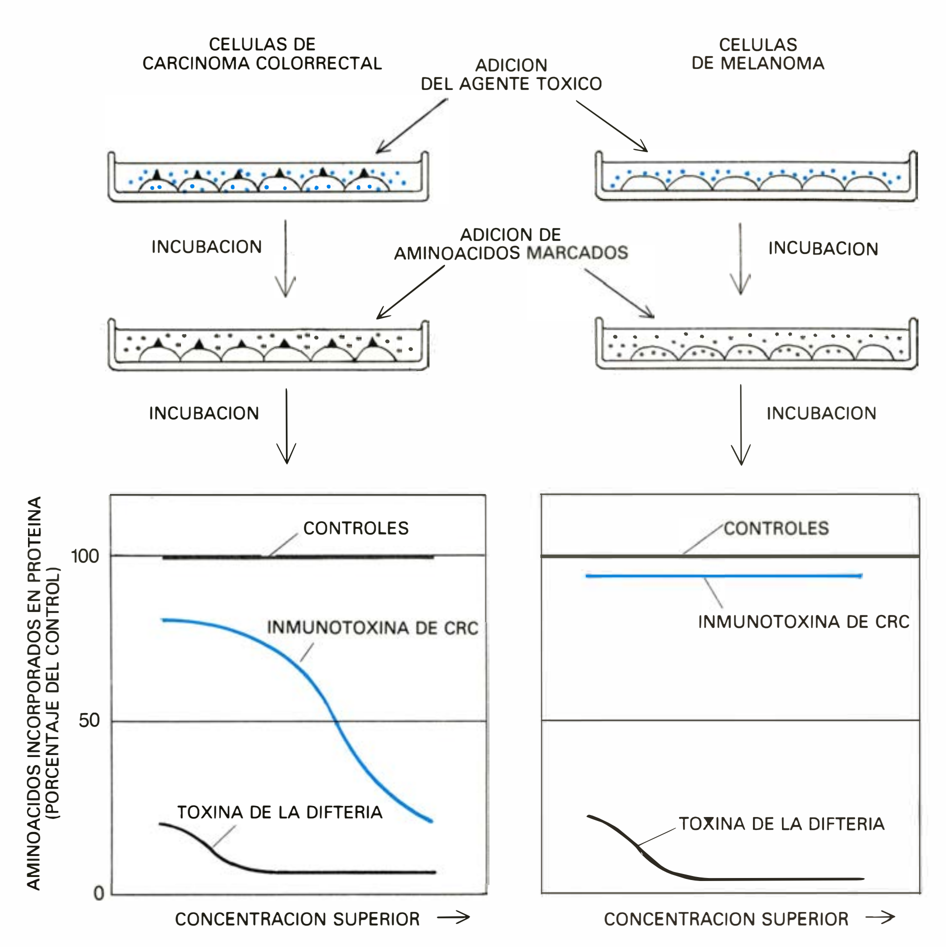
6. INMUNOTOXINA DE CADENA *A* obtenida uniendo un anticuerpo específico contra un antígeno asociado a un tumor (*izquierda*) con la cadena *A* de la toxina de la difteria. A uno de los grupos amino (NH_2) del anticuerpo se le une un agente que actúa de enlace, dotado de un puente disulfuro (*centro*). Al otro extremo del agente de enlace se le une la cadena *A* de la molécula de toxina (*derecha*). El anticuerpo viene a sustituir a la cadena *B* de la toxina.

difteria a la lectina concanavalina *A*. El conjugado resultante era tóxico a bajas concentraciones en células humanas cultivadas. Su toxicidad se inhibía al añadir al medio de cultivo un exceso de concanavalina *A*. Aparentemente, la lectina libre se unía a la superficie de las células, bloqueando la unión del conjugado e interfiriendo así su efecto tóxico. Ello demostraba que la lectina, cuando formaba complejo, era la responsable de la unión del mismo a la superficie celular, tal como esperábamos que fuese. Tsuyoshi Uchida y Yoshio Okada, de la Universidad de Osaka, llegaron a resultados similares uniendo la cadena *A* de la toxina de la difteria a otras lectinas diferentes.

Paralelamente a la obtención de estos resultados, otros laboratorios consiguieron aislar anticuerpos monoclonales contra antígenos de superficie. Algunos de los anticuerpos eran específicos de antígenos asociados a tumores, antígenos que rara vez, si alguna, se encontraban en la superficie de células normales. Zenon Steplewski e Hilary Koprowski, del Instituto Wistar de Filadelfia, consiguieron un anticuerpo monoclonal que se unía a células de carcinoma colorrectal humano (CRC), pero no a otros tipos celulares. Los grupos de UCLA y Wistar decidieron colaborar en la preparación de inmunotoxinas con el anticuerpo anti-CRC.

Las inmunotoxinas se construyeron en UCLA uniendo al anticuerpo la cadena *A* de la toxina de la difteria o de la ricina. Se probaron en Wistar ensayando la capacidad de las células para sintetizar proteínas, que es la función que inhibe la toxina. Los cultivos de células CRC se incubaron durante 24 horas con las inmunotoxinas, con anticuerpos, con cadenas *A* o con toxina de la difteria intacta. A continuación se comprobó, en cada uno de los casos, la capacidad de las células para incorporar aminoácidos en proteínas. Las mismas comprobaciones se realizaron con células de melanoma.

Los resultados fueron alentadores. Incluso a concentraciones muy bajas, las inmunotoxinas bloqueaban eficazmente la síntesis de proteínas en las células CRC, pero no en las células de melanoma. Por el contrario, las toxinas intactas de la difteria ejercían un fuerte efecto en ambos tipos celulares: del melanoma y CRC. Por su parte, los anticuerpos por sí solos no tenían ningún efecto y las cadenas *A* libres presentaban un débil efecto en ambas células. En otras palabras, dentro de la inmunotoxina, la porción de anticuerpo es la responsable de la especificidad por las

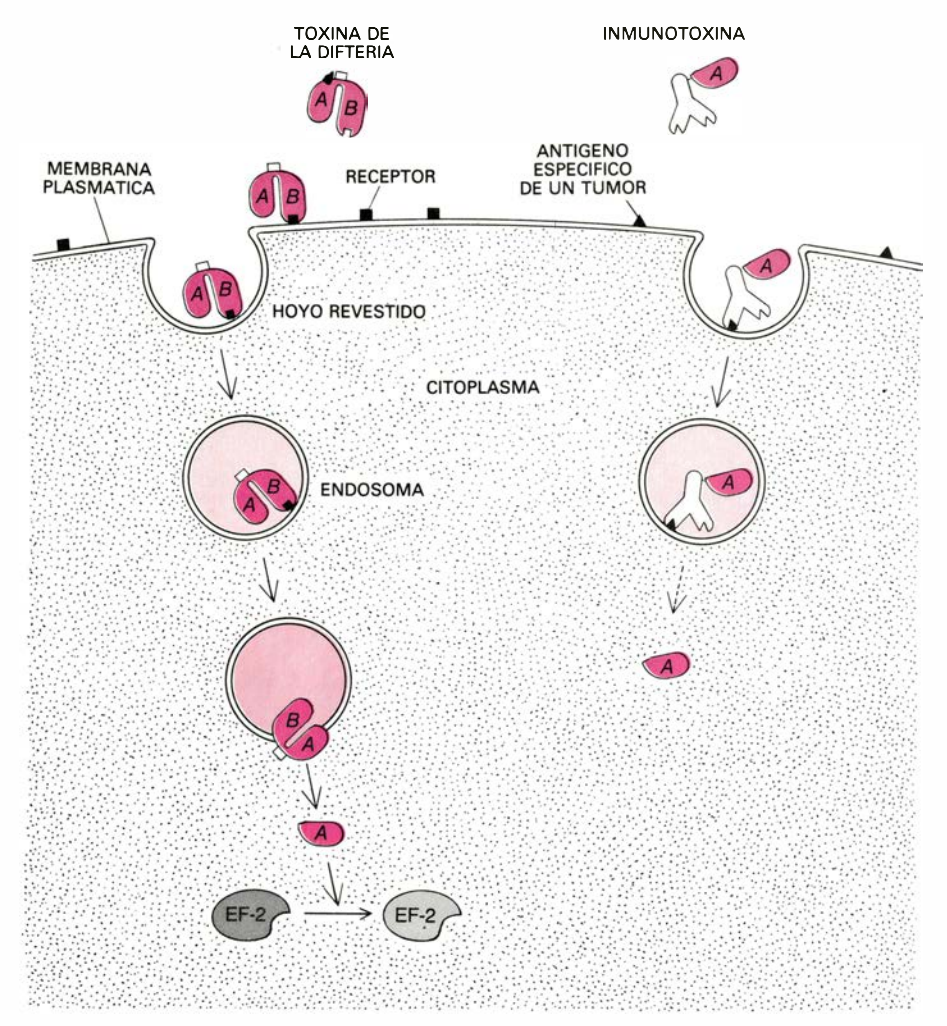


7. INMUNOTOXINAS fabricadas con un anticuerpo monoclonal contra células de carcinoma colorrectal (CRC), en un ensayo para determinar su capacidad inhibidora de la síntesis de proteínas. Se incubó células CRC y de melanoma con inmunotoxinas, con cadenas *A* o anticuerpos libres, y con toxinas de la difteria intactas. Se añadió aminoácidos marcados y se midió la capacidad de las células para incorporarlos en proteínas. Las cadenas *A* y los anticuerpos libres (*controles*) tenían poco o ningún efecto. La toxina de la difteria inhibía la síntesis de proteínas tanto en las células CRC (*izquierda*) como en las de melanoma (*derecha*). Las inmunotoxinas eran eficaces contra las células CRC, pero no contra las de melanoma.

células CRC sobre las que posteriormente actúa la toxina. Era la primera demostración de que un anticuerpo monoclonal contra un antígeno específico de un tumor dirigía la acción de una potente toxina contra células específicas. Por esa época, Keith A. Krolick, Ellen S. Vitetta y Jonathan W. Uhr, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, publicaron un trabajo en el que habían utilizado anticuerpos contra antígenos de células de leucemina de ratón para dirigir específicamente la cadena *A* de la ricina contra dichas células de leucemia.

Esa primera generación de inmunotoxinas, fabricadas con la cadena *A*, constituía sólo un prometedor comienzo. Su toxicidad en las células a las que iban dirigidas era muy variable; en algunos casos dicha toxicidad era muchos órdenes de magnitud menor que la de la toxina intacta. Pronto se dieron algunas razones que explicaban estas extrañas variaciones en cuanto a niveles de toxicidad. La parte enzimáticamente activa de una toxina debe actuar en el citoplasma celular, donde están localizados los EF-2 (la diana de la toxina de la difteria) y los ribosomas (la diana de la ricina). No se sabía muy bien por aquel entonces de qué forma una proteína de gran tamaño entraba en el interior de una célula. Cuando empezamos nuestros trabajos confiábamos en que los complejos con las lectinas, y posteriormente las inmunotoxinas, llegasen hasta el citoplasma, pero no sabíamos exactamente cómo lo harían, ni con qué eficacia.

Conocemos hoy que muchas proteínas atraviesan la membrana celular externa, la membrana plasmática, mediante un proceso denominado endocitosis mediada por receptores [véase "Endocitosis de proteínas y partículas", por Alice Dautry-Varsat y Harvey F. Lodish; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1984]. La membrana plasmática está repleta de receptores, cada uno de los cuales es específico para una determinada proteína o pequeña partícula. La molécula de toxina de la difteria debe



8. POR ENDOCITOSIS MEDIADA POR RECEPTOR parece que entra la toxina de la difteria en las células (*izquierda*). La cadena *B* de la toxina se une a un receptor de la superficie celular, desplazándose hacia uno de los numerosos "hoyos revestidos" que aparecen por invaginación de la membrana plasmática; los hoyos se cierran y constituyen una vesícula denominada endosoma. El ambiente ácido del interior del endosoma (*color claro*) insta a la región hidrófoba de la cadena *B* a insertarse en la membrana endosómica. Parece que la cadena *A* atraviesa la membrana y llega al citoplasma, donde inactiva a EF-2. La inmunotoxina fabricada con la cadena *A* probablemente se una a antígenos tumorales específicos (*derecha*) y se introduzca en la célula por medio de un endosoma, de donde, no se sabe cómo, la cadena *A* pasa al citoplasma. Sin embargo, el paso de la cadena *A* al citoplasma es poco eficaz: las inmunotoxinas formadas con cadenas *A* son menos eficaces que las moléculas de la toxina de las que proceden.

unirse a uno de esos receptores (que probablemente desempeñe un papel beneficioso en la vida habitual de la célula, pero que en este caso se aprovecha de él la toxina). El receptor puede estar ya situado en uno de los muchos hoyos revestidos existentes en la superficie celular, o se desplaza hacia alguno de ellos. En esos lugares, la membrana plasmática se invagina, se pliega hacia dentro, formando una vesícula rodeada de membrana que recibe el nombre de endosoma. Los endosomas transportan los receptores y cualquier molécula que lleven unida (como la toxina) hasta el interior celular.

Dentro del endosoma la toxina pasa al interior celular, aunque la membrana endosómica la mantiene aislada de sus sustrados, EF-2 y NAD. No se sabe muy bien de qué forma la cadena *A* escapa del endosoma para llegar a su sitio de acción. En el caso de la toxina de la difteria hay pruebas de que un aumento de la acidez del ambiente interno del endosoma fomenta la inserción de la toxina en la membrana endosómica. Parece que el puente disulfuro que une las cadenas *A* y *B* se rompe por acción de compuestos reductores del citoplasma. Se libera entonces la cadena *A*, que pasa al citoplasma, quedando la *B* en la membrana endosómica.

Parece, por tanto, que la toxina de la difteria es una enzima muy especializada y poco común. Debe realizar al menos tres funciones distintas: unirse al receptor, insertarse y atravesar la membrana endosómica y transferir la ADP-ribosa al EF-2. Como hemos explicado, la primera de las funciones la desempeña la cadena *B* y la última la cadena *A*. Recientemente se ha comprobado que la inserción en la membrana también depende de la cadena *B*. De hecho, depende de una porción de la cadena rica en aminoácidos hidrófobos, apropiados para la inserción en los lípidos hidrófobos de la membrana.

Se conoce peor la forma en que la ricina llega al citoplasma. En este caso parece que a la acidez del endosoma no le corresponde un papel fundamental. No obstante, la presencia de la cadena *B* de la ricina incrementa notablemente la actividad tóxica de la cadena *A*, sugiriendo la existencia de una región funcional de la cadena *B* que (como en el caso de la toxina de la difteria) es operativa durante el transporte de la cadena *A* al citoplasma.

Los datos sobre endocitosis apuntan hacia dos posibles razones para explicar la baja toxicidad de las inmunotoxinas de cadena *A* comparada con la toxicidad de la molécula "madre" de toxina. Si, como parece, la cadena *A* accede a sus sustratos sólo vía un endosoma, la actividad tóxica de una inmunotoxina debe depender ante todo de la eficacia con que se integra en los endosomas. Ello tiene que ver, a su vez, con la capacidad del antígeno de superficie al cual se une la inmunotoxina para transportarla hacia uno de los hoyos de la superficie celular, donde se va a producir la endocitosis. Una razón para explicar la baja toxicidad de ciertas inmunotoxinas puede ser, por tanto, que el anticuerpo monoclonal que forma complejo con la cadena *A* no se une a los antígenos implicados en el proceso de endocitosis. No obstante, podrían encontrarse anticuerpos específicos contra dichos antígenos.

Existe otra posible razón, que quizá sea más importante. Una vez dentro de la célula, y en un endosoma, la cadena *A* debe salir de éste para encontrar su sustrato. Al menos en el caso de la toxina de la difteria, el transporte a través de la membrana endosómica depende de la región hidrófoba de la cadena *B*. Al sustituir la cadena *B* de la toxina por un anticuerpo se elimina una actividad que resulta crítica para la entrada de la cadena *A* al citoplasma. Aunque logran, no obstante, entrar en el citoplasma, la eficacia es muy baja, comparada con la molécula de toxina intacta. La penetración de la membrana endosómica parece ser un paso limitante en la determinación de la actividad tóxica de una inmunotoxina.

¿Puede incluirse en la inmunotoxina la región de la cadena *B* requerida para la inserción en la membrana y a la vez

GTG AGC AGA AAA CTG TTT GCG TCA ATC TTA ATA GGGGCG CTA CTG GGG ATA GGGGCCCCA CCT TCA GCC CAT GCA
(fMet) Ser Arg Lys Leu Phe Ala Ser Ile Leu Ile Gly Ala Leu Leu Gly Ile Gly Ala Pro Pro Ser Ala His Ala
-21 -11 -1

GGC GCT GAT GAT GTT GTT GAT TCT TCT AAA TCT TTT GTG ATG GAA AAC TTT TCT TCG TAC CAC GGG ACT AAA CCT GGT TAT GTA GAT TCC
Gly Ala Asp Asp Val Val Asp Ser Ser Lys Ser Phe Val Met Glu Asn Phe Ser Ser Tyr His Gly Thr Lys Pro Gly Tyr Val Asp Ser
1 10 20 30

ATT CAA AAA GGT ATA CAA AAG CCA AAA TCT GGT ACA CAA GGA AAT TAT GAC GAT GAT TGG AAA GGG TTT TAT AGT ACC GAC AAT AAA TAC
Ile Gln Lys Gly Ile Gln Lys Pro Lys Ser Gly Thr Gln Gly Asn Tyr Asp Asp Asp Trp Lys Gly Phe Tyr Ser Thr Asp Asn Lys Tyr
31 40 50 60

GAC GCT GCG GGA TAC TCT GTA GAT AAT GAA AAC CCG CTC TCT GGA AAA GCT GGA GGC GTG GTC AAA GTG ACG TAT CCA GGA CTG ACG AAG
Asp Ala Ala Gly Tyr Ser Val Asp Asn Glu Asn Pro Leu Ser Gly Lys Ala Gly Gly Val Val Lys Val Thr Tyr Pro Gly Leu Thr Lys
61 70 80 90

GTT CTC GCA CTA AAA GTG GAT AAT GCC GAA ACT ATT AAG AAA GAG TTA GGT TTA AGT CTC ACT GAA CCG TTG ATG GAG CAA GTC GGA ACG
Val Leu Ala Leu Lys Val Asp Asn Ala Glu Thr Ile Lys Lys Glu Leu Gly Leu Ser Leu Thr Glu Pro Leu Met Glu Gln Val Gly Thr
91 100 110 120

GAA GAG TTT ATC AAA AGG TTC GGT GAT GGT GCT TCG CGT GTA GTG CTC AGC CTT CCC TTC GCT GAG GGG AGT TCT AGC GTT GAA TAT ATT
Glu Glu Phe Ile Lys Arg Phe Gly Asp Gly Ala Ser Arg Val Val Leu Ser Leu Pro Phe Ala Glu Gly Ser Ser Ser Val Glu Tyr Ile
121 130 140 150

AAT AAC TGG GAA CAG GCG AAA GCG TTA AGC GTA GAA CTT GAG ATT AAT TTT GAA ACC CGT GGA AAA CGT GGC CAA GAT GCG ATG TAT GAG
Asn Asn Trp Glu Gln Ala Lys Ala Leu Ser Val Glu Leu Glu Ile Asn Phe Glu Thr Arg Gly Lys Arg Gly Gln Asp Ala Met Tyr Glu
151 160 170 180

TAT ATG GCT CAA GCC TGT GCA GGA AAT CGT GTC AGG CGA TCA GTA GGT AGC TCA TTG TCA TGC ATA AAT CTT GAT TGG GAT GTC ATA AGG
Tyr Met Ala Gln Ala Cys Ala Gly Asn Arg Val Arg Arg Ser Val Gly Ser Ser Leu Ser Cys Ile Asn Leu Asp Trp Asp Val Ile Arg
181 190 S-S 200 210

GAT AAA ACT AAG ACA AAG ATA GAG TCT TTG AAA GAG CAT GGC CCT ATC AAA AAT AAA ATG AGC GAA AGT CCC AAT AAA ACA GTA TCT GAG
Asp Lys Thr Lys Thr Lys Ile Glu Ser Leu Lys Glu His Gly Pro Ile Lys Asn Lys Met Ser Glu Ser Pro Asn Lys Thr Val Ser Glu
211 220 230 240

GAA AAA GCT AAA CAA TAC CTA GAA GAA TTT CAT CAA ACG GCA TTA GAG CAT CCT GAA TTG TCA GAA CTT AAA ACC GTT ACT GGG ACC AAT
Glu Lys Ala Lys Gln Tyr Leu Glu Glu Phe His Gln Thr Ala Leu Glu His Pro Glu Leu Ser Glu Leu Lys Thr Val Thr Gly Thr Asn
241 250 260 270

CCT GTA TTC GCT GGG GCT AAC TAT GCG GCG TGG GCA GTA AAC GTT GCG CAA GTT ATC GAT AGC GAA ACA GCT GAT AAT TTG GAA AAG ACA
Pro Val Phe Ala Gly Ala Asn Tyr Ala Ala Trp Ala Val Asn Val Ala Gln Val Ile Asp Ser Glu Thr Ala Asp Asn Leu Glu Lys Thr
271 280 290 300

ACT GCT GCT CTT TCG ATA CTT CCT GGT ATC GGT AGC GTA ATG GGC ATT GCA GAC GGT GCC GTT CAC CAC AAT ACA GAA GAG ATA GTG GCA
Thr Ala Ala Leu Ser Ile Leu Pro Gly Ile Gly Ser Val Met Gly Ile Ala Asp Gly Ala Val His His Asn Thr Glu Glu Ile Val Ala
301 310 320 330

CAA TCA ATA GCT TTA TCG TCT TTA ATG GTT GCT CAA GCT ATT CCA TTG GTA GGA GAG CTA GTT GAT ATT GGT TTC GCT GCA TAT AAT TTT
Gln Ser Ile Ala Leu Ser Ser Leu Met Val Ala Gln Ala Ile Pro Leu Val Gly Glu Leu Val Asp Ile Gly Phe Ala Ala Tyr Asn Phe
331 340 350 360

GTA GAG AGT ATT ATC AAT TTA TTT CAA GTA GTT CAT AAT TCG TAT AAT CGT CCC GCG TAT TCT CCG GGG CAT AAA ACG CAA CCA TTT CTT
Val Glu Ser Ile Ile Asn Leu Phe Gln Val Val His Asn Ser Tyr Asn Arg Pro Ala Tyr Ser Pro Gly His Lys Thr Gln Pro Phe Leu
361 370 380 390

CAT GAC GGG TAT GCT GTC AGT TGG AAC ACT GTT GAA GAT TCG ATA ATC CGA ACT GGT TTT CAA GGG GAG AGT GGG CAC GAC ATA AAA ATT
His Asp Gly Tyr Ala Val Ser Trp Asn Thr Val Glu Asp Ser Ile Ile Arg Thr Gly Phe Gln Gly Glu Ser Gly His Asp Ile Lys Ile
391 400 410 420

ACT GCT GAA AAT ACC CCG CTT CCA ATC GCG GGT GTC CTA CTA CCG ACT ATT CCT GGA AAG CTG GAC GTT AAT AAG TCC AAG ACT CAT ATT
Thr Ala Glu Asn Thr Pro Leu Pro Ile Ala Gly Val Leu Leu Pro Thr Ile Pro Gly Lys Leu Asp Val Asn Lys Ser Lys Thr His Ile
421 430 440 450

TCC GTA AAT GGT CGG AAA ATA AGG ATG CGT TGC AGA GCT ATA GAC GGT GAT GTA ACT TTT TGT CGC CCT AAA TCT CCT GTT TAT GTT GGT
Ser Val Asn Gly Arg Lys Ile Arg Met Arg Cys Arg Ala Ile Asp Gly Asp Val Thr Phe Cys Arg Pro Lys Ser Pro Val Tyr Val Gly
451 460 S-S 470 480

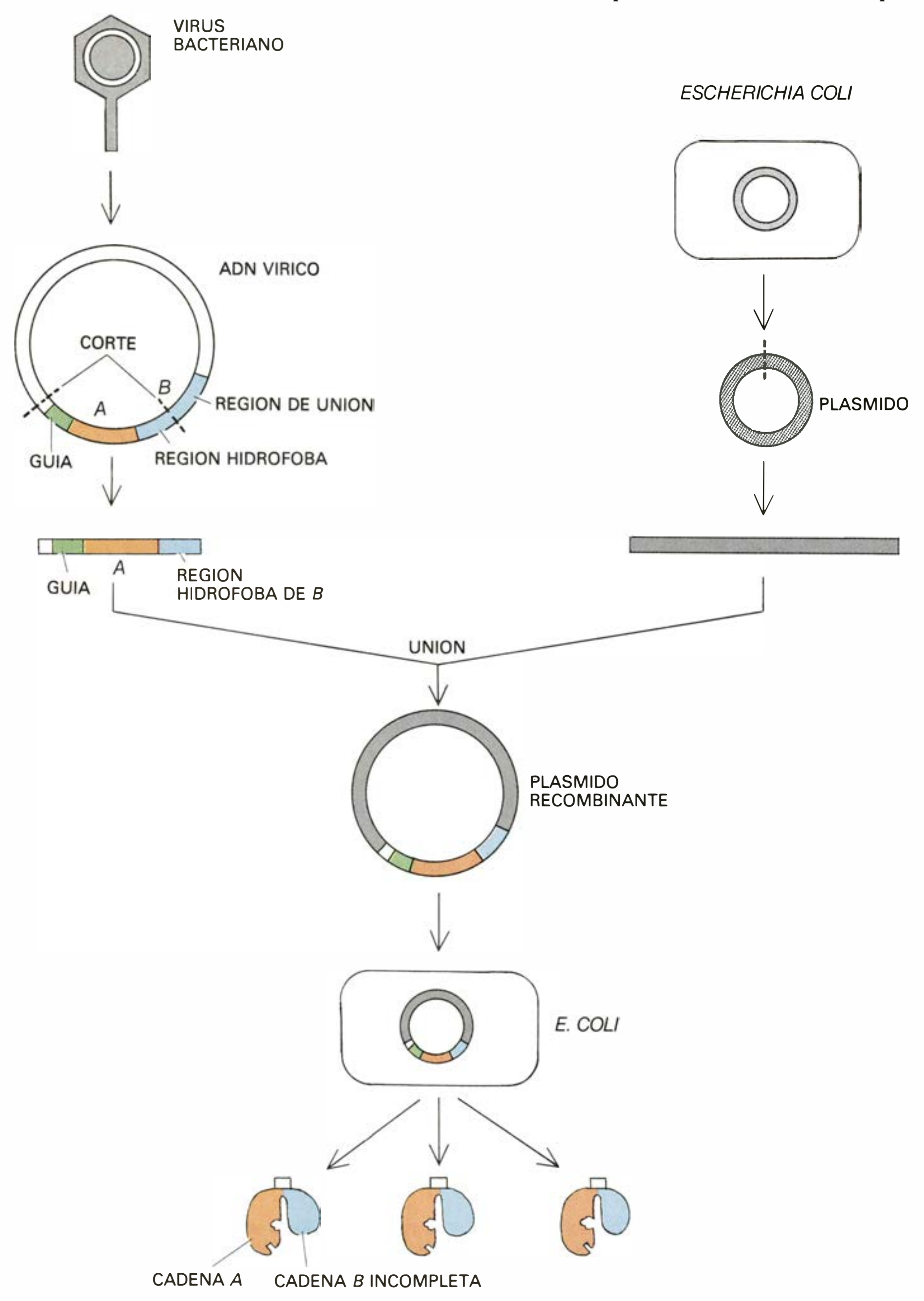
AAT GGT GTG CAT GCG AAT CTT CAC GTG GCA TTT CAC AGA AGC AGC TCG GAG AAA ATT CAT TCT AAT GAA ATT TCG TCG GAT TCC ATA GGC
Asn Gly Val His Ala Asn Leu His Val Ala Phe His Arg Ser Ser Ser Glu Lys Ile His Ser Asn Glu Ile Ser Ser Asp Ser Ile Gly
481 490 500 510

GTT CTT GGG TAC CAG AAA ACA GTA GAT CAC ACC AAG GTT AAT TCT AAG CTA TCG CTA TTT TTT GAA ATC AAA AGC TGA
Val Leu Gly Tyr Gln Lys Thr Val Asp His Thr Lys Val Asn Ser Lys Leu Ser Leu Phe Phe Glu Ile Lys Ser STOP
511 520 530

9. SECUENCIA NUCLEOTIDICA del gen de la toxina de la difteria. Una vez determinada se tradujo, de acuerdo con el código genético, en la secuencia de aminoácidos de la molécula de toxina. La proteína tiene un péptido "guía" (*verde*) implicado en la excreción de la bacteria, una cadena *A* (*naranja*) y una *B* (*azul*). La cadena *B* posee una región rica en aminoácidos hidrófobos (*azul oscuro*), responsable de la inserción de la toxina en la membrana endosómica y, por tanto, de la salida de la cadena *A* del endosoma hacia el citoplasma. El sitio por donde la toxina se une al receptor queda en la cadena *B*, más alejado de la región hidrófoba. Se indican dos puentes disulfuro (*S-S*), uno de los cuales enlaza las dos cadenas. El aminoácido 148 (*enmarcado*) parece que está en el sitio activo, responsable de la adición de la ADP-ribosa al EF-2. Por ingeniería genética se obtiene, del gen, una inmunotoxina (*véase la figura 10*).

eliminar su capacidad de unión al receptor, evitando así que reconozca las células y se una específicamente a ellas? Una estrategia consistía en conservar la cadena *B* entera pero bloqueando su unión a los receptores de la membrana plasmática. Se sabe desde hace tiempo que el azúcar lactosa inhibe la unión de la ricina a la superficie celular, probablemente porque la lactosa ocupa el sitio por donde la ricina se une al receptor. Richard J. Youle y Neville han preparado inmunotoxinas uniendo la molécula de ricina intacta con un anticuerpo monoclonal. Cuando se trata un cultivo celular con esta inmunotoxina en presencia de concentraciones altas de lactosa disminuye bastante la toxicidad inespecífica. Sin embargo, las concentraciones requeridas son tóxicas en animales, por lo que el bloqueo con lactosa no parece factible en seres humanos.

Un método más prometedor consiste en alterar la cadena *B* de forma que se elimine su capacidad de unirse al receptor, pero no la de insertarse en la membrana. Puede lograrse tratando la toxina intacta con un agente químico que altere sólo la parte de la cadena *B* responsable de la unión al receptor, engarzando posteriormente la toxina modificada en el anticuerpo. Ira H. Pastan, del Instituto Nacional del Cáncer, y sus colaboradores, lo consiguieron con la exotoxina *A* de *Pseudomonas*, una toxina bacteriana parecida a la de la difteria en su forma de acción. No se ha encontrado todavía un método similar para la toxina de la difteria o la ricina.



10. GEN DE LA TOXINA DE LA DIFTERIA MODIFICADO, clonado en bacterias y traducido en proteína. El gen de la toxina procede de un virus bacteriano que infecta a *Corynebacterium diphteriae*. Se extrae el ADN vírico (*arriba, a la izquierda*) y de él se aísla un fragmento portador de la región que determina la cadena *A* y la región hidrófoba de la *B*, pero no el sitio de unión al receptor. El fragmento elegido se inserta en un plásmido, un pequeño anillo de ADN extracromosómico, procedente de la bacteria *Escherichia coli*. Se introduce el plásmido recombinante en células de *E. coli*. La bacteria fabrica grandes cantidades del ADN extraño y traduce además el fragmento de gen, fabricando una molécula de toxina modificada a la que le falta el sitio de unión al receptor de la cadena *B*. John R. Murphy y sus colegas, de la Facultad de Medicina de Harvard, han realizado un experimento similar, uniendo una molécula de toxina modificada a una pequeña hormona; el complejo mostró una alta actividad tóxica.

Existe otra forma de alterar la cadena *B* de la toxina de la difteria o de la ricina. En vez de modificar la toxina químicamente, se puede modificar el gen que la determina. Las nuevas técnicas de recombinación de ADN permiten modificar y manipular genes casi a voluntad. En UCLA utilizamos las técnicas de ingeniería genética para construir inmunotoxinas. Nuestro objetivo era aislar el ADN específico de una toxina, eliminar las secuencias nucleotídicas responsables del sitio de unión al receptor de la cadena *B* e introducir después el gen modificado en células de *Escherichia coli*. Dentro de la bacteria se pueden fabricar grandes cantidades de toxina modificada, incapaz de unirse indiscriminadamente a las células, aunque conservando las actividades enzimática y de inserción a la membrana. Luego, esa toxina puede unirse con un anticuerpo monoclonal para conseguir una inmunotoxina específica de un cierto tipo celular.

En UCLA, Michael J. Bjorn y uno de los autores (Kaplan) determinaron la secuencia de nucleótidos de parte del gen de la toxina de la difteria. Ello nos permitió identificar un fragmento del gen, responsable de las regiones enzimáticas e hidrófoba, pero no de la región que determina el sitio de unión al receptor.

Puesto que el producto proteínico del fragmento carecía de toxicidad, el Comité Consultivo para los experimentos de Recombinación de ADN, del Instituto Nacional de la Salud, nos concedió permiso para clonar el fragmento en *E. coli*. Lawrence Greenfield, Bjorn y Kaplan clonaron y secuenciaron todo el fragmento en la Compañía Cetus. El fragmento clonado se expresa en *E. coli*. El producto bateriano conserva las propiedades esenciales de la toxina excepto su capacidad para unirse a células.

En lo que se refiere a las posibles aplicaciones médicas de las inmunotoxinas, quizá la más prometedora en un

futuro próximo sea el tratamiento de la médula ósea durante el transplante. Los enfermos de leucemia suelen someterse a irradiaciones en todo el cuerpo o a quimioterapia, en un esfuerzo por matar las células leucémicas. El tratamiento, sin embargo, también destruye las células "madre" de la médula ósea, precursoras de todas las células sanguíneas. El paciente necesita por tanto un trasplante de médula ósea que le suministre una nueva población de células "madre". El problema es que el trasplante puede inducir un rechazo por parte de los linfocitos *T* de la médula donante, al reconocer éstos a las células del receptor como extrañas y destruirlas.

Para evitar ese problema lo ideal sería eliminar las células *T* antes de introducir la médula del donante en el paciente. Daniel A. Vallera, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Minnesota, y sus colegas han tratado cultivos de células de médula con inmunotoxinas fabricadas uniendo la ricina intacta a anticuerpos específicos de células *T*. Añadieron, además, lactosa para minimizar la toxicidad inespecífica. Por término medio se reducía la población de células *T* de la médula en un 99 por ciento, aproximadamente, con un efecto mínimo sobre las células madre. Actualmente se está probando en pacientes la eficacia de la médula tratada por este método.

Las aplicaciones de este tipo, en las que los tejidos se tratan con las inmunotoxinas fuera del cuerpo, son atractivas como primer paso en la demostración de la efectividad de las inmunotoxinas. El tratamiento de las células fuera del cuerpo es implícitamente más seguro que administrar la inmunotoxina directamente a un paciente, ya que se puede eliminar cualquier exceso de inmunotoxina lavando las células antes de inyectarlas en el receptor.

Sin embargo, el reto a largo plazo es desarrollar inmunotoxinas como una nueva familia de agentes quimioterapéuticos con los que tratar directamente a los pacientes. Se han realizado pruebas de inmunotoxinas en animales, y algunos resultados indican regresión del tumor, o reducción en tamaño. Por ejemplo, Michael I. Bernhard, del Instituto Nacional del Cáncer, y sus colegas trataron cobayos que padecían carcinoma de hígado con una inmunotoxina formada por la cadena *A* de la toxina de la difteria unida mediante puentes disulfuro a un anticuerpo monoclonal dirigido contra un antígeno de la célula cancerosa. Una sola dosis de la inmunotoxina logró reducir el tamaño del tumor, aunque no lo eliminó.

Queda todavía mucho trabajo por hacer, tanto en lo que respecta a anticuerpos como en lo relativo a los agentes tóxicos y métodos de tratamiento. Muchos laboratorios están empeñados en el aislamiento de anticuerpos monoclonales específicos de varios cánceres humanos. Habrá que conseguir un gran número de inmunotoxinas diferentes cuyo componente de anticuerpo sea específico de varios antígenos asociados a tumores en diferentes células cancerosas. Como mencionamos anteriormente, en vez de una toxina natural modificada pueden unirse a esos anticuerpos un isótopo radiactivo o uno de los agentes quimioterapéuticos convencionales. Quizá se identifiquen también anticuerpos que por sí solos inicien un ataque del propio sistema inmune del paciente contra las células cancerosas.

Probablemente a las técnicas de ingeniería genética les corresponda un papel cada vez mayor en el desarrollo de inmunotoxinas. De la misma forma que se puede eliminar la región de la cadena *B* responsable de la unión al receptor manipulando el gen de la toxina de la difteria, cabe modificar genes de toxinas para mejorar la eficacia y seguridad de las moléculas de toxina. En última instancia, podría fabricarse toda la inmunotoxina mediante técnicas de ingeniería genética: aislando el gen del anticuerpo monoclonal que deseamos, modificándolo, si se quiere, para mejorar su afinidad por un antígeno, uniéndolo a un gen de toxina adecuado y sintetizando la inmunotoxina como una sola molécula por medio de células bacterianas o eucariotas, las levaduras, por ejemplo.

En el cuerpo humano, una inmunotoxina estará sometida a un ambiente mucho más completo que el de un cultivo celular. Para que sea eficaz, la inmunotoxina debe permanecer estable mientras transita por el sistema circulatorio, debe ser capaz de acceder a las células diana en muchas partes del cuerpo y, por supuesto, no dañar los tejidos normales cruciales para la supervivencia. Hasta qué punto varias de las inmunotoxinas conocidas satisfacen esos requerimientos es uno de los problemas actualmente en estudio. Aliviar o curar el cáncer mediante quimioterapia es un empeño formidable, en el que habrá que utilizar más de una estrategia. Las inmunotoxinas quizá constituyan una de las muchas armas a emplear en esa lucha.

Ciencia y sociedad

Acuicultura marina

Los abundantes ecosistemas hipersalinos naturales, lagos y lagunas, ubicados en latitudes tropicales, subtropicales y templadas de nuestro planeta y las salinas creadas por la mano del hombre han servido tradicionalmente para la extracción de sal y de otros productos químicos que se encuentran en el agua de mar y en las de estos lagos y lagunas, destino final de las aguas de escorrentía de sus respectivas cuencas endorreicas.

Esta extracción se ha servido de los elevados niveles de evaporación en tales latitudes, evaporación que, al eliminar el agua, provoca la concentración de las sales disueltas, permitiendo pasar, en el caso de las salinas solares marinas, de aguas de mar con una concentración de 35 o 40 gramos de sales por litro a salmueras de 300 gramos por litro, condiciones en las que se produce su cristalización y precipitación en el fondo de los estanques.

Si a estas elevadísimas concentraciones salinas se añade las oscilaciones térmicas que se dan en aguas tan someras como suelen ser éstas (alcanzando temperaturas superiores a los 40 grados durante el día en verano, y descendiendo durante la noche hasta igualar la temperatura del aire) y el escasísimo contenido en oxígeno de estas aguas, explicable por su difícil solubilidad en las condiciones descritas, no es fácil imaginarse estos medios acuáticos como especialmente confortables para el desarrollo de niveles de vida muy activos.

Sin embargo, asistimos allí al desarrollo de una notable actividad, no caracterizada especialmente por su diversidad, como es de esperar, pero sí por su intensidad y espectacularidad. Entre los organismos propios de los medios hipersalinos cabe destacar a las bacterias *Halobacterium* y *Halococcus*, las microalgas verdes del género *Dunaliella*, el ciliado *Fabrea*, larvas de dípteros como la mosca de la sal *Ephydra* y de algunos mosquitos quironómidos, coleópteros acuáticos como *Ochthebius*, algún crustáceo copépodo y, finalmente, el crustáceo braquiópodo anostráceo *Artemia*. Este, no obstante, tener sus ancestros en formas de agua dulce, ha conseguido adaptarse a las condiciones tan extremas de estos hábitats, donde las presiones de sus potenciales predadores se ven suavizadas, aunque no dejan de existir, y entre los que cabe enumerar algunos de los coleópteros acuáticos citados, algunos peces como *Aphanius* y la amplia gama de aves limícolas que caracterizan a tales ecosistemas.

En ciertas épocas del año, más o menos dilatadas según el clima y latitud geográfica, en estos biotopos aparecen cantidades muy variables de unas diminutas partículas esféricas, de color pardo bastante intenso y un diámetro comprendido entre 200 y 300 micras, flotando en la salmuera o acumuladas en las orillas donde han sido empujadas por los vientos o el oleaje. Estas partículas, aparentemente inertes, no son más que los huevos enquistados o huevos de duración de *Artemia*. Están envueltos en su exterior por una cáscara o corion muy resistente a diversos parámetros físico-químicos. Encierran un embrión en estado de vida latente, en criptobiosis, mantenida por la conjunción de una efectiva deshidratación y anaerobiosis.

Cuando estos quistes son colocados en agua salobre o marina se hidratan y el embrión encerrado en su interior reemprende el desarrollo, que hasta entonces había permanecido en suspenso. A partir de las 20 horas de esta hidratación, la cáscara se abre; sale al exterior el embrión prenauplio envuelto en su membrana embrionaria que aún sigue unida a la cáscara vacía. En el interior de la membrana el nauplio ya mueve sus miembros: antenas y mandíbulas. A las pocas horas, esta membrana también se hiende y de su interior surge el nauplio o primera fase larvaria del crustáceo *Artemia*, nadando libremente en el agua.

Este nauplio presenta un tamaño comprendido entre las 400 y 500 micras. Su color, anaranjado, revela el contenido en reservas nutritivas y carotenos. Si se encuentra en un medio adecuado irá creciendo en tamaño a lo largo de unas 15 mudas, pasando por otros tantos estados metanaupliares, hasta llegar a su fase juvenil y, posteriormente, a su fase adulta, sexualmente activa y reproductora. El aspecto de este adulto, macho o hembra, no tiene nada que nos recuerde al del nauplio emergido del quiste. Ha diferenciado claramente cabeza, tronco y abdomen. El tronco presenta 11 pares de patas o apéndices foliáceos que se mueven constantemente, mientras se desplaza captura el alimento y respira. En la cabeza aparece un par de grandes ojos compuestos y pedunculados, otro par de antenas y un tercero de anténulas. Las antenas de los machos se hipertrofian en forma de tenaza para asirse a la hembra en el momento de la fecundación.

En la zona de separación entre el tronco y el abdomen aparecen los aparatos reproductores: un pene par en machos y un útero único en hembras. Tanto los testículos como los ovarios son pares y se encuentran en los primeros segmentos abdominales.

El proceso de cópula es un acto reflejo muy rápido y repetido. El macho se acopla a la hembra asiéndola con sus grandes antenas, en posición dorsal, por la "cintura", o espacio que queda entre el final de los apéndices torácicos y el útero. En esta posición nadan emparejados durante largo tiempo.

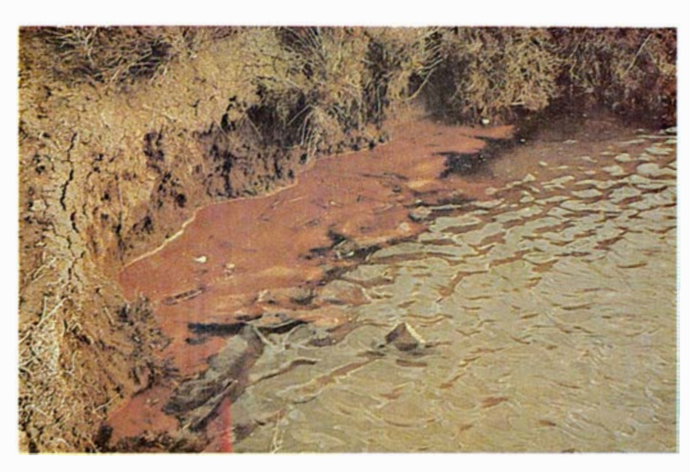
Una vez fecundados, los ovocitos contenidos en el útero de la hembra inician el desarrollo del embrión, desarrollo que dará origen al nauplio antes citado. A tal fin puede llegarse por dos caminos, el ya descrito a partir del quiste de duración, o por un proceso ovovivíparo, según el cual se lleva a cabo el desarrollo completo del nauplio dentro del útero de la hembra. Cuando el nauplio está perfectamente formado es emitido directamente al medio por la hembra a través de la abertura del útero o bolsa ovígera. Sólo cuando el medio exterior reúne una serie de condiciones aún no del todo definidas (falta de alimento, salinidad excesiva, bajos niveles de oxígeno) el embrión inicial es recubierto por el corion o cáscara y es emitido como quiste en criptobiosis.

El enorme interés despertado por *Artemia* arranca de los trabajos de Seale y Rollefsen, cuando emplearon nauplios recién nacidos para el alimento de larvas de peces marinos con notable éxito, en los Estados Unidos (1933) y en Noruega (1939), respectivamente. Desde entonces los nauplios de *Artemia* han formado la dieta primera, como presa viva, para fases larvarias de peces y crustáceos marinos en acuicultura, y la habitual de especies ornamentales en acuariofilia.

El notable desarrollo de la acuicultura marina ha propiciado el encumbramiento de *Artemia* hasta un rango excepcional, lo que ha dado lugar al esta-

blecimiento de importantes niveles de comercialización a escala internacional, principalmente en forma de quistes. En la actualidad, una decena escasa de firmas comerciales manejan el abastecimiento mundial de estos quistes, ubicadas principalmente en los Estados Unidos, que procesan y distribuyen material original de California, Canadá, Brasil, Colombia, China y Australia. Otros países productores y comercializadores de quistes son Brasil y la República Popular China. Los precios que rigen para 1984 oscilan entre las 5000 y 10.000 pesetas el kilo, según el origen, calidad, envasado, cantidad, etcétera; a ellas hay que añadir los costes de transporte, seguro, aduanas y otros, que suelen ascender al 30 por ciento del valor de la mercancía en origen.

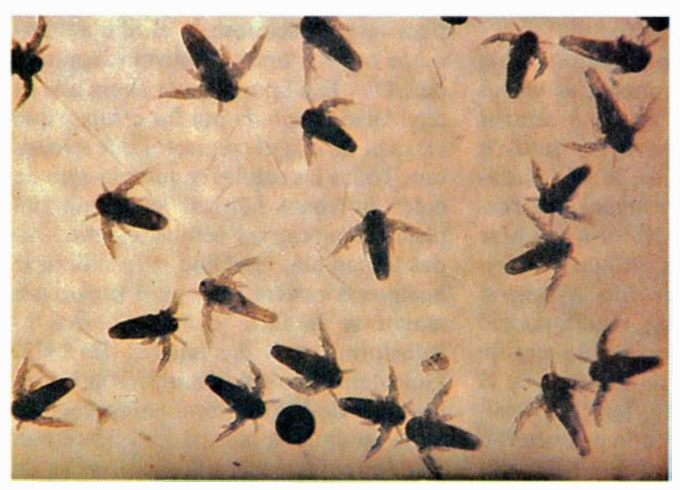
Artemia también es motivo de transacción comercial en forma de biomasa viva, congelada y liofilizada, y, a buen seguro, entra en la composición de fórmulas comerciales para alimentos de peces en acuariofilia. Una de las empresas americanas tradicionalmente explotadoras de las poblaciones de *Artemia* de las salinas californianas llega a comercializar del orden de 1500 toneladas de biomasa al año. De ellas, la mayor parte en forma congelada, a



1. Acumulación de quistes de **Artemia** *en la orilla de un estanque evaporador o calentador de una salina*



2. Prenauplios en estado de emergencia. La membrana embrionaria es aún solidaria al corion (50 aumentos)



3. Nauplios de **Artemia** *recién eclosionados (30 aumentos). Forma habitual de aplicación en acuicultura marina*



4. Secuencia de crecimiento y desarrollo metanaupliar en hembras de **Artemia** *hasta alcanzar el tamaño juvenil*



5. Hembras partenogenéticas en proceso de ovulación. Los oocitos son las formaciones arrosariadas de color blanco



6. Pareja (macho y hembra) de ejemplares de raza bisexual de **Artemia** *en acoplamiento*

unos precios que oscilan entre 5 y 7 dólares por kilogramo. Esta misma empresa comercializa *Artemia* liofilizada y viva con destino a acuariofilia. El precio de la forma viva que rige para mayoristas oscila entre 15 y 25 dólares el kilogramo, y es fácil imaginar que este precio pueda llegar a duplicarse, como mínimo, en la tienda del minorista. La forma viva quizá tenga su mayor comercialización a nivel local, referido al territorio de los Estados Unidos, pero la aventura de su exportación a Europa parece rentable. En el continente europeo existe una empresa francesa que comercializa del orden de 10 toneladas anuales en forma congelada, oscilando su precio, en el minorista, entre 7 y 10 dólares el kilogramo. No parece lejano el día en que estas empresas, que trabajan exclusivamente con biomasa original de ecosistemas naturales, sufran la concurrencia de biomasas procedentes de sistemas en cultivo intensivo totalmente controlado.

En España se está llevando a cabo numerosos trabajos de investigación, de campo y de laboratorio, con el fin de poner en explotación amplias extensiones de salinas que han reducido drásticamente sus actividades extractivas de sal a causa de sus bajos niveles de rentabilidad. Estas instalaciones poseen aún una infraestructura básica que, con ligeras modificaciones, podría dar pie a rentables producciones de quistes y biomasa de *Artemia* con que autoabastecer plantas de acuicultura anejas o distribuidas por todo el país, aspirando a alcanzar niveles de independencia con relación a la situación de "cuello de botella" que a menudo suele plantearse a escala internacional.

Aunque estas investigaciones están orientadas en gran parte a su aplicación en salinas y en forma extensiva, se está logrando resultados muy importantes a escala de planta piloto, en cultivos intensivos. Pueden aprovecharse altos niveles de producción primaria, principalmente de algas unicelulares del fitoplancton, en sistemas forzados mediante abonados orgánicos e inorgánicos adecuados, diversos sistemas de aireación y circulación del medio y máximo aprovechamiento de la energía solar. En estos casos se puede sacar partido de la propia fecundidad y capacidad reproductiva de *Artemia*, que se manifiesta espectacular e ininterrumpidamente a lo largo de todo el año, si se procede a repetidas extracciones o recolecciones de la biomasa conseguida.

También se están desarrollando métodos de cultivo intensivo, empleando subproductos agrícolas, ganaderos o industriales, de bajo precio, como alimento de *Artemia*, entre ellos los salvados de cereales, harinas, levaduras, estiércoles líquidos, barros activos de tratamiento de aguas residuales y otros. En este caso, partiendo de pequeñas cantidades de nauplios recién nacidos, del orden de unos 100 o 200 gramos, se puede conseguir cantidades superiores a los dos o tres kilogramos de biomasa formada por metanauplios avanzados y juveniles, al cabo de 2 semanas, transformando diversos productos residuales en biomasa con niveles proteicos del orden del 50 al 70 por ciento en peso seco.

A modo de reflexión final es preciso constatar la enorme potencialidad que representan muchos miles de hectáreas de salinas, o de terrenos transformables en tales, en las zonas tropicales y subtropicales de países en vías de desarrollo en Africa y América, donde podría establecerse planes y programas de desarrollo de acuicultura de integración vertical, que englobaran desde *Artemia* hasta muy diversas especies de peces y crustáceos de interés comercial, para consumo autóctono y para la exportación.

En programas semejantes, a escala nacional, se hallan empeñados varios científicos adscritos a diversos centros de investigación del país: Instituto de Acuicultura de Torre de la Sal (Castellón), Instituto de Investigaciones Pesqueras de Cádiz, Laboratorio del Mar Menor, Laboratorios de Cádiz y Huelva del Plan Marisquero de la Región Suratlántica (PEMARES), Laboratorio del Centro de Tecnología Pesquera de Taliarte y la Facultad de Biología de la Universidad de Porto, en Portugal. Entre ellos están surgiendo prometedores niveles de coordinación y colaboración. (Francisco Amat.)

Sobra colesterol

De acuerdo con la investigación epidemiológica, existe relación entre un elevada concentración sanguínea de colesterol (así como consumo de tabaco e hipertensión) y la incidencia de aterosclerosis y ataques cardiacos; los datos asocian también altos niveles de colesterol en sangre con la ingesta de dietas ricas en colesterol y grasas saturadas. Cabe preguntarse, por tanto, si la reducción del colesterol y de grasas en la dieta disminuiría la aterosclerosis. A principios de este año, el Instituto Nacional del Corazón, Pulmones y Sangre de los Estados Unidos comunicaba los resultados de un estudio de diez años según el cual la disminución de los niveles sanguíneos de colesterol reduce el riesgo de ataque cardiaco. El trabajo sólo consideró varones de media edad con niveles iniciales de colesterol elevados; además, el colesterol bajaba con fármacos, no por dieta. Muchos investigadores de la aterosclerosis se aprestan ahora a comprobar si la extrapolación de esos resultados a la modificación de la dieta sería eficaz para la población general. La controversia colesterol-dieta sigue, por tanto, sin resolverse.

Guardan relación con el debate los trabajos de Joseph L. Goldstein y Michael S. Brown, del Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, quienes han descrito detalladamente los mecanismos por los que aumenta el nivel de colesterol circulante, favoreciéndose la formación de placas ateroscleróticas que terminan por ocluir la luz de las arterias.

El colesterol circula por la corriente sanguínea empaquetado en partículas globulares de lipoproteína de baja densidad (LDL). Se origina una placa aterosclerótica cuando la LDL invade la pared de una arteria y deposita su colesterol; el principal factor de riesgo para la aterosclerosis y el ataque cardiaco es, por tanto, el nivel sanguíneo de LDL. Esa lipoproteína abandona la circulación captada por las células, que extraen de ella el colesterol que necesitan. Todas las células requieren algo de colesterol para fabricar su membrana plasmática; ciertas células especializadas toman más cantidad para sintetizar hormonas esteroideas, pero la porción mayor se la lleva el hígado, que lo transforma en ácidos biliares. En 1973, Goldstein y Brown descubrieron los receptores de LDL; proteínas embebidas en la membrana plasmática que captan LDL circulante e inician el proceso de endocitosis mediada por receptor, por el cual penetra la LDL en las células y se degrada en colesterol.

El aporte de colesterol a las células lo regula un sistema de retroalimentación cuyo elemento capital es la síntesis de moléculas del receptor LDL. Cuando una célula dispone de suficiente colesterol, se reduce la expresión del gen que determina el receptor; la célula elabora menos receptores y, por tanto, extrae menos LDL de la circulación. Una disminución amplia del número de receptores (especialmente en el hígado) conduce al aumento de los niveles sanguíneos de colesterol, y con ello a la aterosclerosis.

Se ha demostrado la indudable relación entre receptores LDL y aterosclerosis en estudios de hipercolesterole-

mia familiar (FH), enfermedad genética provocada por una mutación del gen del receptor de LDL. Las células de los heterocigotos, que tienen un gen normal y otro mutante, sintetizan la mitad de lo que suele ser el número normal de receptores; las células de los homocigotos, cuyos genes son ambos mutantes, no sintetizan receptores normales. El nivel plasmático de LDL se duplica en los heterocigotos, cuyo riesgo de ataque cardiaco antes de los 60 años de edad es 25 veces superior al de la población normal; los homocigotos tienen niveles de LDL más de siete veces superiores al normal, y suelen padecer un ataque cardiaco fatal antes de alcanzar los 20 años.

Goldstein y Brown han tratado con éxito heterocigotos FH por medio de fármacos que crean un déficit de colesterol en las células y, así, estimulan la expresión del gen del receptor de LDL; las células sintetizan y exponen un mayor número de receptores. Uno de los fármacos interrumpe el retorno de ácidos biliares al hígado, lo que incrementa el nivel de demanda de colesterol. Las células reaccionan elaborando más receptores, pero aumentan también la síntesis *de novo* de colesterol. Para bloquear esta segunda respuesta de retroalimentación, y forzar a las células a depender exclusivamente de la LDL circulante como fuente de colesterol, se administra un fármaco que inhibe una enzima de la vía anabólica del colesterol. El tratamiento con ambas drogas fuerza al gen del receptor de los heterocigotos FH a elaborar más receptores y reduce el nivel de LDL circulante en un 50 por ciento.

¿Qué interés pueden tener los resultados de estos ensayos, desarrollados en pacientes de una grave alteración genética, para la formación de aterosclerosis en personas dotadas de un juego normal de genes del receptor de LDL? Goldstein y Brown sostienen que gran parte de la aterosclerosis que se da en la población normal es atribuible a niveles elevados de LDL circulante provocados por una producción inadecuada de receptores. En el nacimiento, el nivel de LDL del hombre es comparable con el de otras especies animales, pero aumenta con la edad, probablemente porque desciende el número de receptores. Varias razones se aducen para explicar ese descenso; la más verosímil tiene que ver con la ingesta de una dieta rica en colesterol y grasas saturadas. La acumulación de colesterol en las células detiene directamente la síntesis del receptor; indican los datos epidemiológicos que las grasas saturadas elevan el colesterol, pero se desconoce el mecanismo de que se valen. Según Goldstein y Brown, habría que aconsejar una moderada restricción del colesterol y las grasas en la dieta de la mayoría de la gente, así como una restricción severa en las personas con una historia familiar con abundantes ataques de corazón y apoplejías. Quizá resulte eficaz y seguro para la población normal el tratamiento farmacológico desarrollado para los heterocigotos FH, lo que restaría importancia a las limitaciones dietéticas.

De lo ínfimo a lo máximo

Hace sólo unos cuantos años hubiera resultado desconcertante, cuando menos, que una de las sesiones plenarias de una conferencia internacional de física de altas energías estuviera dedicada a la cosmología. Sin embargo en la XXII Conferencia celebrada en Leipzig (República Democrática Alemana) del 19 al 25 de julio pasados, ello no sorprendió a nadie. Los físicos de altas energías, los que recogieron la antorcha de los físicos nucleares que a su vez la habían tomado de los físicos atómicos, en su afán por conocer los componentes últimos de la materia han construido aceleradores de partículas enormes y tecnológicamente complicados que permiten averiguar cuáles son los componentes de la materia hasta distancias mínimas, del orden de 10^{-16} centímetros. (Compárese este tamaño con los 10^{-8} centímetros del radio de un átomo, o con los 10^{-12} del radio de un núcleo.) Pero por suerte o por desgracia las teorías construidas para comprender los resultados experimentales encontrados tienen un ámbito de predicción mucho más amplio, hasta distancias del orden de 10 elevado a menos treinta y tantos centímetros. ¿Qué pasa a estas distancias? Si bien el coste de desarrollar nuevas teorías es pequeño, pues el científico "trabaja barato", las comprobaciones experimentales son mucho más caras, y, dado el estado actual de desarrollo de la técnica, no parece probable que con los aceleradores presentes, en construcción o en fase de diseño, podamos ir hasta distancias muy por debajo de los 10^{-16} centímetros.

Curiosamente tenemos a nuestro alcance muestras de lo que sucede, o mejor dicho, sucedió, a distancias mucho menores. La cosmología nos explica que en el origen del universo, cuando se produjo la gran explosión ("big bang"), las energías que se generaron fueron del orden de la llamada energía de Planck, unas 10^{19} veces la masa del protón, energía enorme que corresponde a distancias varios órdenes de magnitud menores que 10^{-30} centímetros. Desde entonces, el universo se expande y todo lo que vemos a nuestro entorno es una reliquia de los que sucedió hace unos 10^{10} años. Se trata tan sólo de saber leer en un libro abierto ante nuestros ojos, pero parece ser que por el momento los físicos cosmólogos apenas empiezan a balbucear algunas letras.

En la conferencia de Leipzig cerca de un millar de físicos de todo el mundo han analizado durante seis días cargados de sesiones los logros alcanzados en los dos años transcurridos desde la última conferencia internacional, así como las perspectivas para el futuro inmediato. Y hay que reconocer que si bien en algunas cosas sólo se sabe balbucear, la situación general es muy interesante. Se dispone ya de teorías de partículas elementales que permiten describir los procesos, habiéndose abandonado ya la fase "zoológica" en que cada conferencia exponía las partículas o resonancias que se habían encontrado, con lo cual iba en aumento el confusionismo sólo iluminado por algunos modelos o ideas de sistematización. Hoy día la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil de Glashow, Salam y Weinberg nos ofrecen un marco teórico coherente en el que se pueden hacer cálculos e interpretar los resultados experimentales. Así, estas teorías permiten hacer predicciones como la relativa a la existencia de los bosones intermediarios $W^{\pm}$ y Z^0, de los que ya se ha hablado en esta sección de la revista y cuyo hallazgo constituye, sin duda, lo más destacado del bienio.

Ha sido precisamente esta importancia la causa de que en Leipzig se hablara poco del propio descubrimiento de los $W^{\pm}$ y Z^0 realizado a comienzos del año pasado: todos los participantes estaban plenamente informados. La niña bonita de la conferencia ha sido la comunicación por parte de la colaboración UA1 del CERN del aparente descubrimiento del quark "cima" ("top"). Este sexto quark reclamado insistentemente por las teorías estándar viene a completar la tercera generación de quarks y leptones; hasta ahora se había resistido a los esfuerzos acometidos para detectarlo. Con él quedan establecidos, por el momento, los componentes de la materia agrupados en tres generaciones: la primera, que forma esencialmente todo lo que nos rodea, está formada por el electrón y su neutrino y los quarks arriba ("up") y abajo

("down"); la segunda la constituyen el muon y su neutrino y los quarks extraño ("strange") y encanto ("charm"); la tercera la forma el leptón tau y su neutrino (aún no claramente detectado) y los quarks valle ("bottom") y cima ("top"). Estos fermiones, junto con los bosones responsables de las interacciones (fotones, gravitones, *W, Z* y gluones), aportan los datos necesarios para conocer todo cuanto nos envuelve.

El supersincrotón del CERN, en su funcionamiento como colisionador protón-antiprotón, se ha adjudicado así un nuevo éxito a añadir al descubrimiento de los bosones intermediarios. Debe insistirse, sin embargo, que la colaboración de UA 1 dirigida, por Carlo Rubbia, se mueve con exquisita cautela: no afirman haber descubierto el quark cima ("top"), sólo dicen que un conjunto de sus resultados son compatibles con la desintegración del *W* en un quark cima ("top") y un antiquark valle ("bottom"), y con la posterior desintegración del quark cima en un quark valle y un par leptón-neutrino. Esta interpretación, que es la única dentro de las teorías estándar, da para el quark cima ("top") una masa comprendida entre 30 y 50 veces la masa del protón, siendo por el momento imposible precisar más en su medida. Una masa tan elevada explica por qué no se había detectado durante la intensa búsqueda realizada en el acelerador del DESY (Hamburgo): sólo puede crear esos quarks cima de masas inferiores a unas 23 veces la masa del protón. La confirmación y mejora de los resultados no se podrá realizar hasta la nueva recogida de datos en el colisionador p-$\bar{p}$ que tendrá lugar en otoño. De todas maneras, la opinión general es que se ha detectado el quark cima. Y "top" ha quedado, por lo menos, materializado en un cachorro de tigre del zoológico de Leipzig, a quien se bautizó con dicho nombre.

Aunque el descubrimiento de este sexto quark era conocido por los asistentes a la conferencia, pues su anuncio se hizo público a primeros de julio en el CERN, una noticia más inesperada fue la posible detección de un bosón de Higgs. A la teoría electrodébil debemos predicciones sorprendentes: recuérdese la existencia de corrientes neutras descubiertas en el CERN hace unos diez años, la existencia de los *W* y *Z*; pero hay un aspecto de la teoría que no está claro: ¿cómo adquieren su masa los bosones intermedios *W* y *Z*? El mecanismo estándar exige la existencia de unas partículas de espín cero, los bosones de Higgs, de los cuales ha de existir por lo menos uno, de carga cero. El hecho de que su masa quede indeterminada en un amplio margen e interaccione escasamente con los fermiones puede justificar que haya escapado a su detección; ello, a su vez, ha inducido a pensar en mecanismos alternativos al de Higgs.

En la conferencia de Leipzig la colaboración del detector Crystal Ball, de DESY, ha presentado la detección de un bosón de 8,3 GeV de masa que, si bien ofrece características anómalas para ser un bosón de Higgs, tampoco encaja en ningún esquema normal. En los próximos meses veremos multiplicar los análisis de datos a estas energías relativamente bajas a fin de esclarecer, primero, la existencia de esta partícula, llamada ζ por sus descubridores, y luego, conocer mejor sus características. Si se confirman los primeros resultados, es más que probable que el sector de bosones de Higgs sea más rico y complejo de lo que muchos esperaban.

También merece mencionarse los estudios empeñados en resolver dos problemas que hace tiempo que esperan solución: ¿Son estables los protones? ¿tienen masa los neutrinos? La primera pregunta ha sido abordada por numerosos experimentos en todo el mundo y hasta la fecha la no evidencia de desintegraciones de protones permitía establecer que la vida media de éstas superaba los 10^{32} años, lo que ponía en entredicho las teorías de gran unificación de la cromodinámica cuántica con la teoría electrodébil, al menos en sus versiones más sencillas. El experimento japonés de Kamioka ha encontrado algunos sucesos que parecen provenir de la desintegración de protones, por lo que es de esperar que en un próximo futuro se ponga en claro el asunto de la estabilidad del protón.

En cuanto a la pregunta sobre la masa de los neutrinos, el equipo ruso de ITEP presentó nuevos resultados más precisos que confirman una masa no nula de los neutrinos, cifrada en algunas decenas de electronvolt. Al mismo tiempo, si bien no se han detectado oscilaciones de neutrinos, los resultados experimentales no permiten asegurar su ausencia. Ambos resultados referentes a los neutrinos son importantes y deberán irse precisando, ya que sus implicaciones, de gran interés, influyen, por ejemplo, en la densidad de masa del universo. Y con referencia a esta densidad de masa digamos que sigue sin confirmarse la existencia de monopolos magnéticos, acerca de cuya situación informó Blas Cabrera, nieto e hijo de conocidos físicos españoles.

A pesar del momento esperanzador que atraviesa la física de partículas no debe creerse que la situación es del todo satisfactoria. Tanto desde un punto de vista cosmológico como microcósmico, el panorama está lleno de incógnitas. Por ejemplo, las distintas versiones del universo inflacionario presentan problemas que quizá se resuelvan con la nueva inflación caótica; los problemas de las masas de las partículas elementales (leptones y quarks) siguen sin encontrar solución; los nuevos resultados experimentales del colisionador $p\bar{p}$ del CERN presentan no sólo evidencia del quark cima ("top"), sino también sucesos de difícil interpretación. ¿Qué salida puede darse a este y a otros problemas? Se trata de ampliar los esquemas existentes, manteniendo lo positivo de los mismos y ensanchándolos de suerte que hallen acomodo interpretaciones más satisfactorias con niveles superiores de simplicidad. Las direcciones que se apuntan son diversas, estando entre las más elegantes o posibilistas las supersimetrías, los modelos compuestos y las teorías de tipo Kaluza-Klein.

Aunque planteadas hace más de diez años, las supersimetrías sólo han gozado del favor de los físicos desde fechas recientes y quizás aumente ahora gracias a determinados sucesos registrados

"SISTEMA PERIODICO" DE LAS PARTICULAS ELEMENTALES

CARGA ELECTRICA	QUARKS			LEPTONES			CARGA ELECTRICA
	FUERZA NUCLEAR FUERTE			SIN FUERZA NUCLEAR FUERTE			
+ 2/3	ⓤ ARRIBA ("UP")	ⓒ ENCANTO ("CHARM")	ⓣ CIMA ("TOP")	(ν_e) NEUTRINO ELECTRONICO	(ν_μ) NEUTRINO MUONICO	(ν_τ) NEUTRINO TAUONICO	0
− 1/3	ⓓ ABAJO ("DOWN")	ⓢ EXTRAÑO ("STRANGE")	ⓑ VALLE ("BOTTOM")	(e^-) ELECTRON	(μ^-) MUON	(τ^-) TAU	−1

Los seis quarks predichos por la teoría y, al parecer, ya observados por todos. A la derecha, los seis leptones que entran también en la descripción de la materia

en el colisionador del CERN, que permiten una interpretación consistente con la existencia del gluino, la partícula supersimétrica del gluon. Si las supersimetrías, aparte de su elegancia teórica, tienen algo que ver con el mundo físico lo sabremos en los próximos años, cuando se vayan manifestando las partículas compañeras supersimétricas de todos los quarks, leptones, fotones, *W*, *Z*,... existentes, cuya masa se la supone en el rango alcanzable por los próximos aceleradores.

Los resultados del CERN también han despertado un gran interés por los modelos compuestos. Ocurre que un 25 por ciento de las desintegraciones del *Z* se producen acompañadas de un fotón muy energético, que sólo debería estar presente en un uno o dos por ciento de los casos. Aunque la estadística es baja (tres sucesos de un total de doce) y cabe pensar en una extraña fluctuación estadística, tales sucesos parecen indicar algo en lo que ya se había especulado: nuestros componentes más elementales, leptones y quarks, no son elementales. La historia de los átomos, de los núcleos, de los piones y protones, se repite: ¡lo supuesto elemental e indivisible ya no lo es! Consta, a su vez, de otras piezas más elementales todavía. Si estos sucesos se confirman y se pone en evidencia esta posible subestructura de los quarks y leptones que muchos no desean, nos encontraríamos ante un nuevo estrato de la composición última de la materia y deberíamos romper algunos esquemas muy cómodos a cambio de comprender algo más. Pero nos costará mucho introducirnos entre distancias tan pequeñas. Necesitamos aceleradores mayores y, quizás, de nuevas técnicas de análisis. Es pronto para hacer predicciones.

Con referencia al sueño dorado de los físicos de disponer de una teoría única que nos explique toda la riqueza y variedad de fenómenos e interacciones, la situación en que nos encontramos no es del todo satisfactoria. En opinión de Abdus Salam, la teoría más ingeniosa está basada en la vieja idea de Kaluza y Klein de unificación de los campos gravitatorios y electromagnéticos en un espacio de cinco dimensiones, una de las cuales se torna compacta. Las actuales versiones de la idea se basan en un espacio de más dimensiones, por ejemplo 11, de las cuales siete se compactan quedando las otras cuatro del espacio-tiempo ordinario. Se trata de una idea atractiva para lograr un mejor conocimiento y un mayor grado de unificación. (Ramón Pascual.)

Forma y función en la locomoción de los peces

Hay peces especializados para navegar, acelerar o maniobrar, pero la mayor parte son generalistas: presentan una mezcla de cualidades locomotoras. Se correlaciona la forma de cada pez con su natación

Paul W. Webb

El interés del hombre por el movimiento de los peces no es de hoy. Textos hindúes de hace 2500 años recogen ya algunas de las ideas más antiguas sobre la natación de esos vertebrados. En el mundo occidental, las hipótesis de Aristóteles, aunque bastante apartadas de la realidad, se aceptaron hasta finales del siglo XIX. Proponía el filósofo griego que todos los animales vertebrados se movían empujando contra un determinado número de puntos de contacto con el exterior. Su hipótesis era que los peces empujaban contra el agua con dos pares de aletas, cuatro combaduras del cuerpo o una combinación de aletas y combaduras. Los difíciles problemas de observación y análisis que presenta el estudio de la natación explican en parte la persistencia de esta interpretación. Los peces se mueven rápidos y recorren trechos largos en poco tiempo. Por otra parte, las fuerzas propulsoras son complejas y se ejercen en un medio fluido, lo que dificulta su medición.

Hacia finales del siglo XIX, los avances registrados en las técnicas cinematográficas permitieron abordar el examen detallado de la natación. Progresaba la construcción de túneles de viento y depósitos de agua experimentales y se asentaban también los conceptos fundamentales de la hidrodinámica. Esos avances alentaron nuevas investigaciones sobre las fuerzas físicas que intervienen en el movimiento natatorio. Como ocurre con cualquier cuerpo sólido sometido a propulsión, el movimiento hacia delante del pez es el resultado neto de las fuerzas que tienden a hacerlo avanzar y de las que lo frenan. La fuerza impelente es el empuje generado por los movimientos de natación. Las fuerzas oponentes proceden de la resistencia inercial y de la resistencia al avance por parte del agua.

Hacia la década de 1930, Charles M. Breder, del Museo Americano de Historia Natural, y Sir James Gray, de la Universidad de Cambridge, habían descrito la cinemática de la natación, esto es, los movimientos implicados en la natación. Hacia los años 60, Gray, Richard Bainbridge y John R. Brett, de la Junta Canadiense de Investigación en Pesquerías, contribuyeron de manera notable al esclarecimiento de la energética de la natación, es decir, de las relaciones entre fuerza y energía generadas por los movimientos de propulsión. En los últimos 15 años, los avances, apoyados en las bases establecidas por la labor de esos pioneros, se han sucedido con especial rapidez. Las teorías cuantitativas formuladas por Sir James Lighthill, de Cambridge, T. Y. Wu, del Instituto de Tecnología de California, y Daniel Weihs, del Instituto de Tecnología de Israel, muestran de qué modo los peces generan el empuje y cómo calcular la magnitud del mismo. Las nuevas teorías esclarecen asimismo la incidencia de la forma del pez sobre el empuje y la resistencia al avance.

Por tanto, pese a constituir el tema de la natación de los peces una fuente de interés durante dos milenios y medio, sólo en las dos últimas décadas han empezado los estudios cuantitativos a iluminar de qué modo la forma se halla relacionada con la manera de nadar y el modo de vida. La acción recíproca de empuje y resistencia determina que ciertas formas corporales sean mejores para acelerar, otras mejores para navegar y unas terceras mejores para maniobrar. Esas son las tres funciones principales de la natación. En algunos peces el cuerpo está especializado para una sola de ellas. Por ejemplo, el cuerpo largo y esbelto del lucio está bien adaptado a la aceleración, lo que le beneficia a la hora de depredar pequeños peces. A cambio de esa especialización, el lucio sacrifica, sin embargo, un rendimiento máximo en la navegación y en la maniobra.

La mayoría de los peces no son especialistas: su cuerpo les permite rendimientos moderadamente buenos en las tres funciones, sin alcanzar un rendimiento superior en ninguna de ellas. La perca atruchada puede navegar, maniobrar y acelerar bastante bien, pero no puede acelerar como el lucio, navegar como el atún o maniobrar como el pez ángel. Los estudios sobre la natación de los peces realizados en los últimos 15 años han permitido determinar qué rasgos corporales contribuyen a su rendimiento de manera significativa. Puesto que las opciones de comportamiento de un pez están determinadas en gran parte por la capacidad de natación, por primera vez se ha podido correlacionar, con precisión, el diseño del animal con su modo de vida.

Ondulación y oscilación

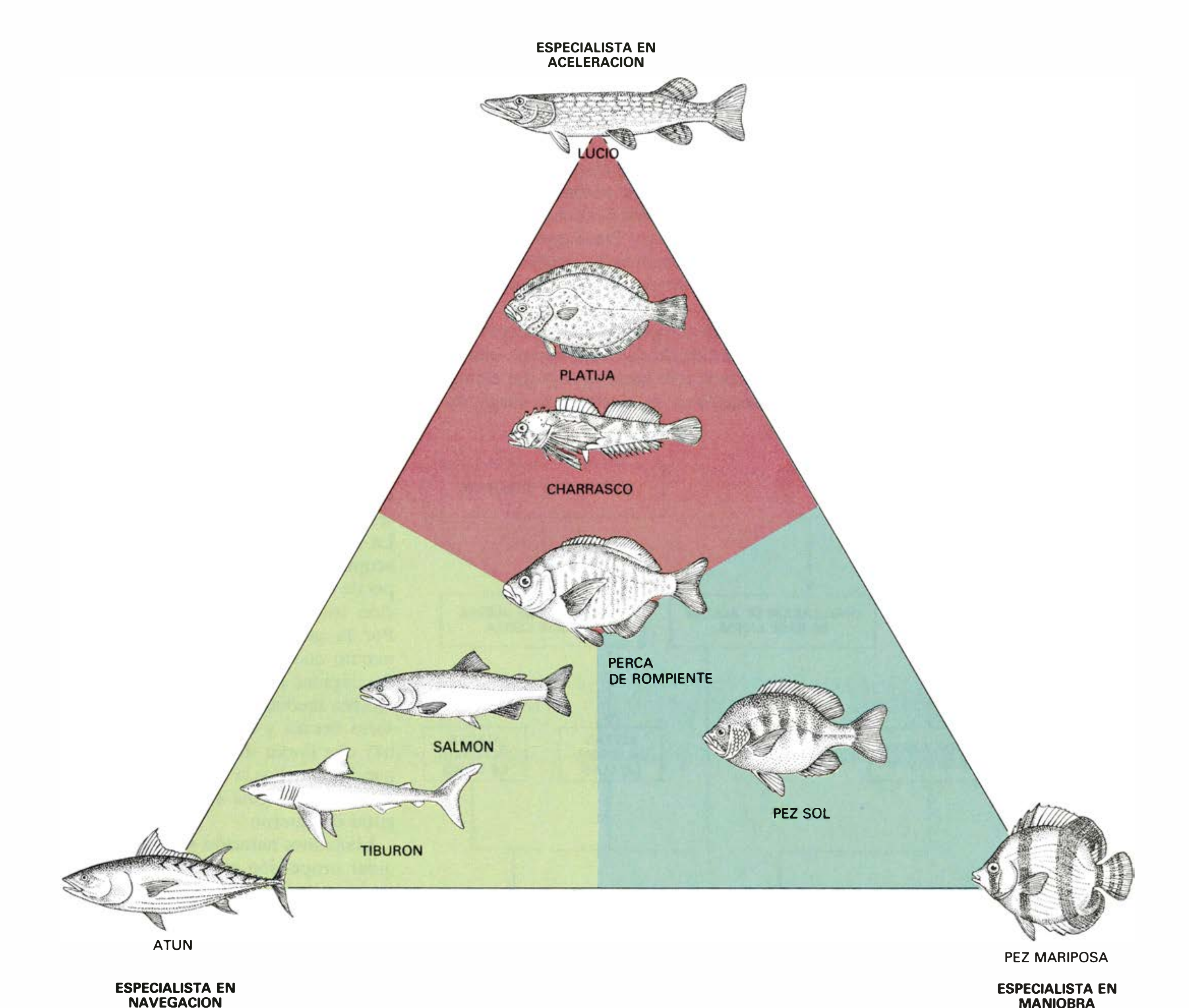
Es evidente la notable variedad de formas y tamaños de los peces. Desde el pez cuchillo, largo, delgado y afilado, anguiliforme, hasta el pez ballesta, especie tropical de cuerpo aproximadamente romboidal, visto de lado, y extremadamente estrecho cuando se le observa de frente o desde atrás. No sólo varía el cuerpo de los peces; también sus apéndices lo hacen. El pez cuchillo tiene una aleta que se extiende a lo largo de la línea media de la cara ventral (inferior) del cuerpo. El pez ballesta tiene muchas pequeñas aletas de base corta en las caras dorsal (superior) y ventral del cuerpo, y también a los lados.

Para complicar la cuestión, todas las partes del cuerpo y todos los apéndices participan en la natación de algún pez:

el propio cuerpo, la aleta caudal (la cola), las aletas pares de los lados del cuerpo y las aletas medias de las caras dorsal y ventral. Diríase que tal diversidad convirtiera nuestra pretensión de conocer la morfología funcional de los peces (es decir, la conexión entre la forma del animal y su manera de nadar) en algo inabordable.

Por fortuna para el ictiólogo, esta tarea resulta mucho más fácil, pues la locomoción se funda en principios unificadores. Principios que nos facultan para dividir a los peces en grandes grupos según su modo de natación. El primer principio establece la distinción entre movimiento ondulante y movimiento oscilante. En el ondulante, u ondulatorio, una onda recorre el propulsor, es decir, la estructura que proporciona la fuerza propulsora. Dos son los tipos de estructura que pueden ondular: 1) el cuerpo y la aleta caudal, que actúan como una sola unidad, y 2) las aletas fijadas al cuerpo por una base larga. Esas aletas de base larga pueden insertarse sobre la línea media de las caras dorsal y ventral o bien, en pares, a los lados. La caballa, los tiburones, los salmones, el lucio, las percas americanas, las truchas y las anguilas se impulsan por el movimiento ondulante del cuerpo y de la aleta caudal. El pez cuchillo se vale, para propulsarse, de la aleta ondulante de larga base de su superficie ventral.

En el movimiento oscilante la parte del cuerpo que proporciona la fuerza propulsora se mueve hacia delante y hacia atrás, al tiempo que gira sobre su base, sin presentar el movimiento en ondas que muestran las estructuras ondulatorias. Las aletas fijadas al cuerpo mediante una base corta suelen oscilar. Como veremos, las aletas oscilantes recurren a dos principios físicos bastante diferentes para generar la fuerza propulsora. La perca de rompiente y el pez mandarín son ejemplos de peces que emplean aletas oscilantes como principal fuerza propulsora. En general, las



1. PLANO DE LA MORFOLOGIA FUNCIONAL en la locomoción de los peces; comprende tipos especialistas y generalistas. Los peces situados en los vértices del triángulo están especializados para una función natatoria: el atún para la navegación sostenida, el lucio para acelerar en rápidas acometidas hacia la presa y el pez mariposa de bandas para la maniobra a baja velocidad por el arrecife de coral. Sus formas reflejan esa especialización. Cada especialista desempeña mal las otras dos funciones. Así, el atún no acelera ni maniobra bien. La perca de rompiente, en el centro del triángulo, combina las tres funciones. Puede acelerar, navegar y maniobrar bastante bien, pero no realiza ninguna de esas funciones con el acierto del especialista. Entre el centro del triángulo y los vértices de éste se sitúan los peces más especializados que la perca de rompiente y menos que el atún, el lucio o el pez mariposa.

aletas oscilantes y ondulantes no ayudadas por movimientos del cuerpo se utilizan cuando el pez se desplaza a poca velocidad en situaciones donde la maniobra de precisión contribuye de forma importante a su alimentación o a su supervivencia. La natación rápida precisa de más energía; de ahí que para la aceleración y la natación de alta velocidad se utilice el músculo del miotomo, es decir, la gran masa de tejido situada a ambos lados del cuerpo.

¿De qué modo la ondulación o la oscilación de una parte del cuerpo se traduce en el empuje que le propulsa a través del agua? Gran parte de los estudios encaminados a resolver esta cuestión se refieren a los movimientos ondulatorios; de éstos, el que mejor conocemos es el de la ondulación conjunta de cuerpo y aleta caudal. Cuando el cuerpo ondula, una o más semilongitudes de onda viajan de la cabeza a la cola a mayor velocidad que la del pez en el agua.

En la ondulación, cada elemento propulsor, un pequeño segmento del cuerpo, se mueve lateralmente con respecto a la cabeza. A medida que pasa la onda, el elemento propulsor acelera el agua circundante. La fuerza generada por los músculos acelera el agua; el agua ejerce sobre el elemento propulsor una fuerza opuesta e igual, la llamada fuerza de reacción. La magnitud de la fuerza de reacción es igual al producto de la aceleración conferida al agua por la masa del agua acelerada. La fuerza es perpendicular al elemento propulsor y se halla inclinada hacia la cabeza del pez.

La fuerza ejercida sobre un elemento propulsor tiene dos componentes. Considérese un pez que nada en línea recta (es decir, sin girar). Una componente de la fuerza sobre el elemento propulsor corre paralela a la dirección global de movimiento del pez: la fuerza longitudinal. La otra componente es perpendicular a la dirección global del movimiento: la fuerza lateral. Cuando el pez nada sin girar, sólo la componente longitudinal contribuye al empuje.

Contribuciones al empuje

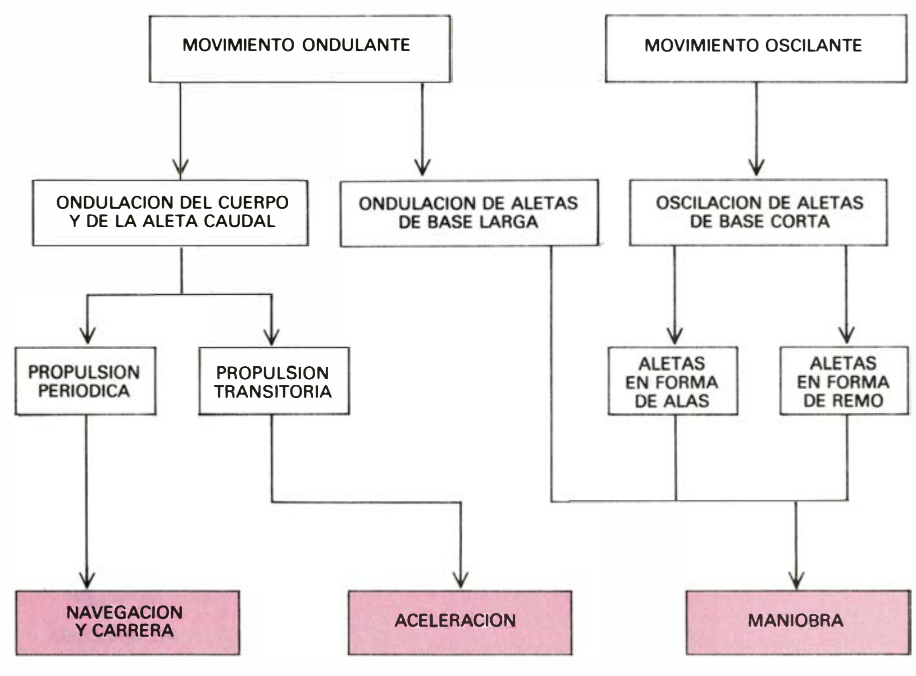
La fuerza longitudinal generada por los elementos propulsores situados cerca de la cola es mayor que la fuerza generada por los elementos próximos a la cabeza. Dos razones explican por qué los elementos caudales contribuyen más al empuje. Tiene que ver la primera con la inclinación caudal de los segmentos cercanos a la cola, que es grande.

Para comprender el concepto de inclinación caudal imaginemos una línea trazada a lo largo del eje del elemento propulsor, es decir, a lo largo de la línea media del cuerpo del animal [*véase la figura 7*]. Cuando la onda propulsora pasa a lo largo del cuerpo, la línea que corresponde al eje del elemento se curva de suerte que el lado que empuja contra el agua mira hacia la cola. Dibujemos ahora una segunda línea, perpendicular a la primera; la línea perpendicular representa la fuerza de reacción que actúa sobre cada elemento, y se dirige hacia la cabeza. A medida que pasa la onda propulsora, los elementos situados cerca de la cola se curvan más hacia atrás que los elementos más cercanos a la cabeza. La fuerza de reacción que actúa sobre los elementos posteriores tiene, por tanto, una dirección más cercana a la del movimiento global del pez, por lo que una porción mayor de la fuerza ejercida por el agua sobre el elemento es paralela a la dirección del movimiento.

La segunda razón por la que los elementos situados cerca de la cola efectúan una contribución al empuje superior a la de los elementos situados cerca de la cabeza es que, a medida que pasa la onda, los elementos posteriores atraviesan una distancia mayor que los anteriores. De ahí que la velocidad de los elementos próximos a la cola sea mayor, y que aceleren el agua más que los elementos situados cerca de la cabeza del pez.

El modo en que los elementos propulsores generan el empuje mientras la onda se mueve a lo largo del cuerpo y de la aleta caudal es de gran importancia a la hora de determinar qué forma servirá mejor a los requisitos del pez. La natación basada en el movimiento acoplado del cuerpo y de la aleta caudal puede dividirse en dos categorías: natación transitoria y natación sostenida. Por la primera entendemos el movimiento que se observa en las arrancadas rápidas y en los giros potentes; se efectúa mediante movimientos propulsores breves y de gran amplitud. Los hay que duran sólo decenas de milisegundos; en ellos la cola puede atravesar una distancia igual a la mitad de la longitud del cuerpo.

Llamamos natación sostenida a cualquier propulsión con movimientos natatorios repetidos cíclicamente; tales movimientos incluyen generalmente varios golpes de la cola. La natación sostenida puede dividirse, asimismo, en varios tipos, atendiendo a la duración de la propulsión. Por ejemplo, la navegación es un tipo de natación que puede mantenerse durante una hora o más. La carrera, otro tipo de natación sostenida, puede durar sólo unos pocos segundos. El mecanismo por medio del



2. TIPOS DE PROPULSION utilizados por los peces. En el movimiento ondulante una onda recorre la porción del cuerpo o de la aleta que proporciona la fuerza propulsora. En el movimiento oscilante la estructura anatómica se mueve hacia atrás y hacia adelante. La navegación, la carrera y la aceleración precisan el movimiento ondulante acoplado del cuerpo y de la aleta caudal (la cola). En la propulsión periódica, que se emplea en la navegación y en la carrera, los movimientos natatorios se repiten de modo cíclico. En la propulsión transitoria, que se emplea para la aceleración, los movimientos no se ajustan a un ciclo. Los peces que maniobran lentamente utilizan el movimiento oscilante de aletas con base corta (que pueden funcionar como alas o como remos), o bien el movimiento ondulante de aletas de base larga.

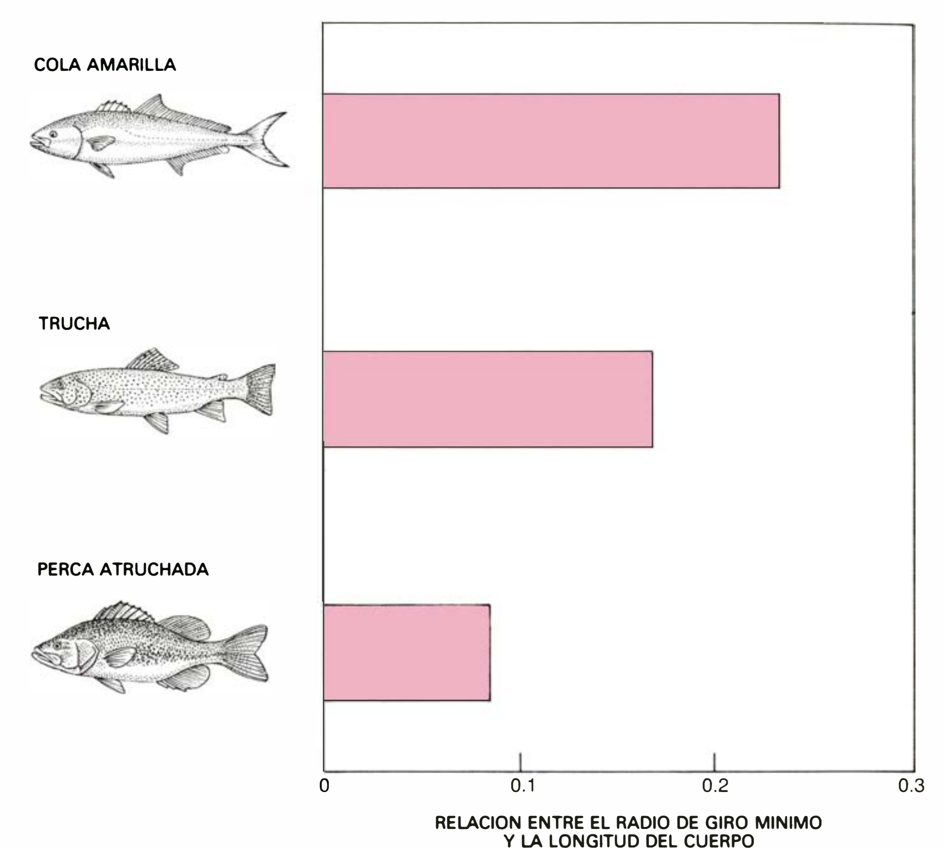
cual el movimiento ondulante del cuerpo produce un empuje tiene distinta incidencia sobre la natación transitoria y sobre la natación sostenida; por cuya razón, los peces que emplean sobre todo la aceleración rápida presentan una forma distinta de la de los peces que navegan por amplias zonas del océano a un ritmo uniforme.

Natación transitoria

Una de las variables que más influyen sobre la natación transitoria en razón del método de generación de empuje es la forma de la silueta vista lateralmente. Cuando el elemento propulsor se mueve, acelera cierta cantidad de agua, denominada masa añadida. La magnitud de la masa añadida viene a coincidir con la masa de agua que contiene un cilindro cuyo diámetro sea igual a la altura del elemento propulsor (medido desde el borde superior del cuerpo o de la aleta al borde inferior) y de breve longitud.

De ahí se sigue que, para maximizar el empuje, cada elemento propulsor debe ser lo más alto posible; ello conferiría una silueta muy alta a las especies que fiaran en el cuerpo y la aleta caudal para su propulsión. Sin embargo, una silueta alta maximiza el empuje sólo cuando cada elemento propulsor efectúa una contribución independiente al empuje, es decir, cuando no hay una interacción significativa entre los elementos. En la natación sostenida, la acción de un elemento tiene un efecto considerable sobre la acción de los demás; la interacción ejerce una profunda influencia sobre la silueta que proporciona el mejor rendimiento. Sin embargo, en la natación transitoria hay poca interacción entre los elementos, por lo que una silueta alta conduce a un aumento del empuje. Se favorece así un cuerpo y aleta media muy altos, como el de los peces planos y de los charrascos, peces que con frecuencia son nadadores transitorios.

El rendimiento que proporciona una determinada forma corporal no depende únicamente de la magnitud del empuje. Por el contrario, el rendimiento depende del balance neto entre el empuje y la resistencia. Al igual que en el empuje, los factores que determinan la resistencia en la natación transitoria son distintos de los que la determinan en la natación sostenida. En la natación transitoria la tasa de aceleración es alta y la resistencia proviene principalmente de la inercia. Puede minimizarse el efecto de la inercia haciendo tan pequeño como sea posible el peso muerto no muscular (es decir, el peso del cuerpo que corresponde a los tejidos que no son músculo esquelético). De hecho, el músculo miotómico de un pez especializado para la natación transitoria puede representar el 60 por ciento de la masa corporal total.



3. EFICIENCIA DE LA NATACION TRANSITORIA, que puede medirse por la relación entre el radio de giro mínimo del centro de la masa corporal en una arrancada rápida y la longitud total del cuerpo. Cuanto menor es esa relación, mayor es la eficiencia. La perca atruchada es más eficiente en una arrancada rápida que la trucha o el cola amarilla, puesto que tienen la máxima superficie corporal en relación a su masa; la superficie se emplea en el empuje, mientras que la masa ofrece resistencia al giro.

El análisis que hemos hecho de la natación transitoria nos sugiere que hay un diseño óptimo para peces cuyo modo de vida se basa, en gran parte, en rápidas arrancadas. El diseño corresponde a un cuerpo suficientemente flexible para doblarse en una onda de gran amplitud; un cuerpo y aletas de gran superficie y un cuerpo que, en su mayor parte, es músculo. Aunque parece una combinación ventajosa, ningún pez posee todas esas características. Los factores no locomotores, en particular los relacionados con la alimentación, dejan sentir también su influencia, de modo que el diseño óptimo para la natación transitoria no es necesariamente el mejor para el bienestar global del pez.

En vez de presentar todas las características del diseño óptimo, muchos nadadores transitorios han desarrollado una forma en la que predomina una de las características. Por ejemplo, el charrasco es un nadador transitorio con un diseño que maximiza el empuje. Posee grandes aletas dorsales y ventrales que proporcionan al pez una silueta alta en todo su cuerpo. Sin embargo, el diseño del charrasco no rinde la máxima proporción de músculo miotómico. Su cabeza, grande y pesada, presenta una geometría muy adecuada para alimentarse de los animales del fondo. El peso no muscular no puede reducirse al mínimo; sólo el 30 por ciento de la masa corporal del charrasco es músculo miotómico.

El lucio

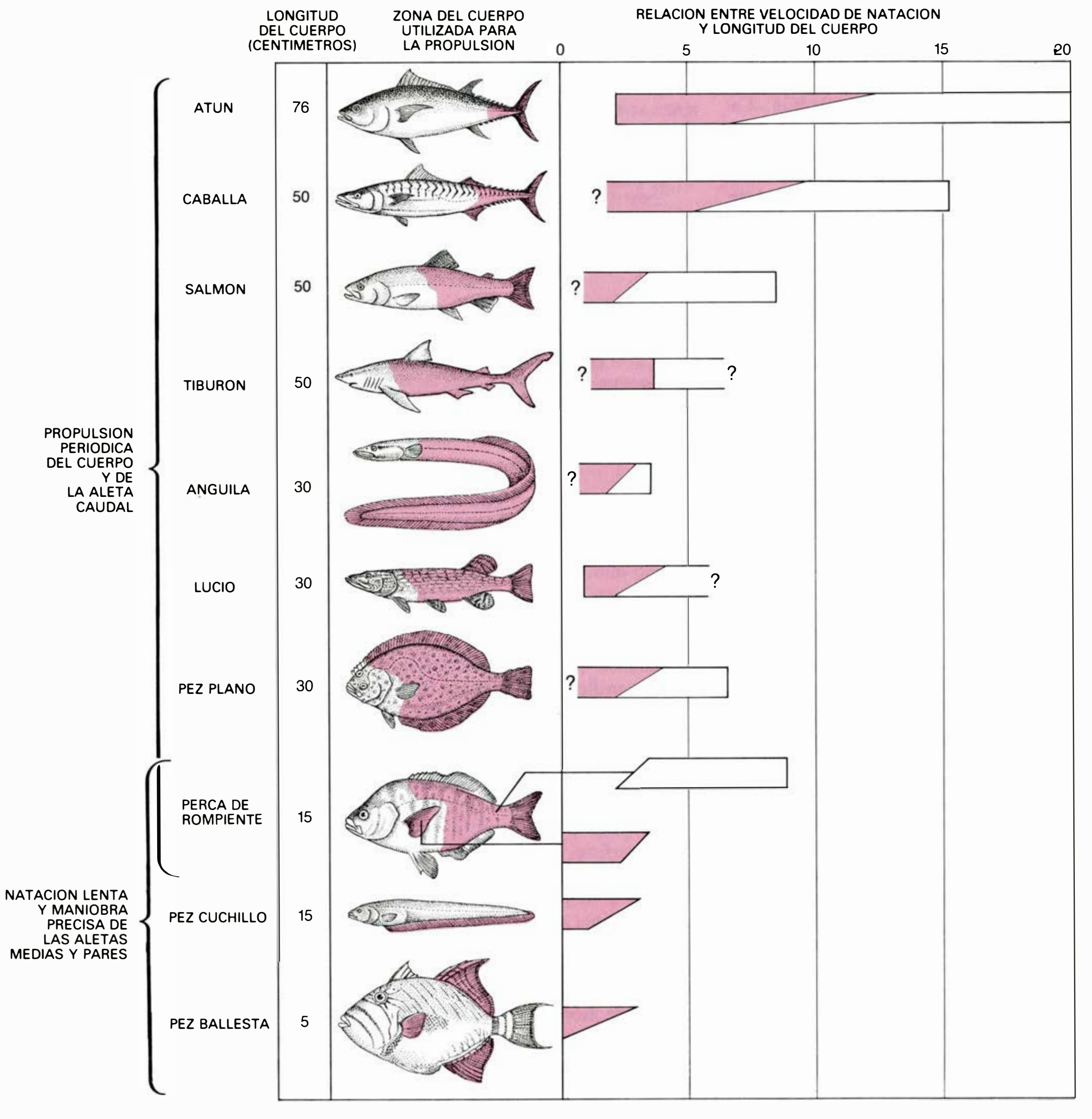
Su peculiar diseño proporciona al lucio, otro especialista en aceleración, una baja resistencia. El cuerpo del lucio es músculo en un 55 a 60 por ciento; el pez tiene incluso una piel delgada. La minimización de peso muerto no muscular es de suponer en un depredador que captura a su presa sirviéndose de una rápida aceleración. Aun así, el lucio no se conforma al diseño óptimo para la natación transitoria porque su silueta sólo es alta cerca de la cola; cerca de la cabeza, es baja.

Puesto que una silueta alta a todo lo

largo del cuerpo ofrece un empuje máximo en una arrancada rápida, que la silueta del lucio sea baja cerca de la cabeza no parece tener sentido para cazar presas pequeñas. Para averiguar qué otros factores influyen sobre el diseño del lucio, varios de mis alumnos de la Universidad de Michigan y yo mismo comparamos la arremetida del muscalonge tigre, un pariente híbrido del lucio y de forma similar, con la arremetida de la trucha, la perca atruchada y la perca de roca.

Se encontró que los peces presa eran mucho más lentos en responder al muscalonge que en responder a los demás depredadores: en el 70 u 80 por ciento de las arremetidas, el muscalonge capturaba a su presa antes de que el pez pequeño comenzara a alejarse. Las presas eran mucho más rápidas a la hora de evadir a los demás depredadores: sólo en un 30 por ciento de las arremetidas de la trucha y de los dos tipos de percas americanas se logró la captura de las presas.

La disparidad en el umbral de respuesta de la presa se debe en gran medida a la forma de la sección transversal lateral del cuerpo del depredador, que es la silueta a la que la presa responde cuando el depredador arremete. Truchas y percas americanas tienen una sección lateral que se parece a una elipse alineada verticalmente. Los peces son extremadamente sensibles a esta forma. Sin embargo, el lucio posee una sección lateral más próxima a la figura de un disco, porque sus aletas dorsales



4. NATACION PERIODICA Y MANIOBRA pueden conseguirse con casi cualquier parte del cuerpo. Esta ilustración muestra las estructuras utilizadas para la propulsión (*color*) por algunos nadadores periódicos y maniobradores. Se indica también el espectro de velocidad en la navegación (*parte coloreada de la barra*) y el mismo en la carrera (*parte blanca de la barra*); los maniobradores tienden a navegar a velocidades bajas. Los interrogantes indican que no se conoce con precisión los límites del rendimiento. La perca de rompiente puede ser un nadador periódico o un maniobrador: recurre al movimiento del cuerpo y de la aleta caudal para la carrera y al movimiento oscilante de las aletas pectorales pares cuando desea navegar o maniobrar.

terminan bastante más atrás de la cabeza. Por tanto, en el cuerpo del lucio el diseño óptimo para la locomoción debe amoldarse a factores sensoriales de la presa.

En la natación sostenida, la interacción entre el cuerpo del pez y el medio circundante conduce a formas óptimas de cuerpo y aletas muy distintas de las que caracterizan al charrasco y al lucio. En la navegación y en la carrera, los movimientos de propulsión se repiten en forma cíclica. Por mor de esa repetición de movimientos, a la natación sostenida se la llama también propulsión periódica. Al navegar y al emprender la carrera, la amplitud del batimiento de la cola es menor que en la propulsión transitoria. La cola se desplaza una distancia que raramente excede el 20 por ciento de la longitud del cuerpo, y así éste puede doblarse en un número mayor de longitudes de onda.

En la propulsión periódica el agua acelerada por un elemento propulsor se ve inmediatamente afectada por la acción del elemento situado detrás mismo. Como hemos visto, los elementos posteriores avanzan más deprisa que los anteriores, y la inclinación caudal de los elementos posteriores es mayor que la inclinación de los elementos más cercanos a la cabeza. Por ello, el efecto del elemento propulsor posterior es aumentar la magnitud de la aceleración dada al agua por el elemento situado delante. En la propulsión periódica los elementos propulsores interactúan, y el último elemento de la cola (que corresponde al borde de ataque del pez) determina la aceleración neta transmitida al agua. En la mayoría de los peces el movimiento del borde de ataque determina también la masa añadida final. De aquí que en la generación de empuje el borde de ataque de la cola sea el elemento crucial. Se sigue de ello que interesa que la punta de la cola sea lo más alta posible.

El cuello estrecho

La acción de los elementos propulsores traseros reviste gran importancia en la natación sostenida; parece, por tanto, que el diseño óptimo para un pez que pasa gran parte del tiempo navegando incorpore una silueta trasera alta, quizás algo parecido a la silueta trasera del lucio. Sin embargo, existen varias razones para que no sea así. De hecho, puede demostrarse que entre las características de diseño óptimas para la natación periódica se cuenta el alargamiento del cuerpo frente a la cola para formar un estrecho pedúnculo caudal, es decir, un delgado vástago al que se fija la cola. Lighthill califica este diseño de la cola de "cuello estrecho"; se trata de un rasgo característico de los peces que pasan su vida navegando.

¿Por qué es tan valioso el diseño de cuello estrecho? Por una parte guarda relación con la fuerza lateral, la componente de la fuerza de reacción que no contribuye al movimiento del pez hacia delante, sino que dirige el cuerpo hacia el lado. La fuerza lateral tiende a hacer que la parte del cuerpo cercana a la cabeza retroceda, es decir, que oscile lateralmente. En la natación periódica la fuerza lateral puede llevar a un considerable derroche de energía. Si todos los elementos propulsores tuvieran la misma altura, la fuerza lateral sería mayor en los elementos posteriores. Con una disminución en la altura del cuerpo frente a la cola mengua la derrochadora fuerza lateral.

La oscilación lateral se reduce más aún por un aumento de la masa del cuerpo cerca de la cabeza. La resistencia que la parte anterior del cuerpo opone al efecto de la fuerza lateral crece con una aleta en la cara superior del cuerpo; he ahí una explicación de la presencia de aletas medias adelantadas en muchos animales acuáticos.

El diseño de cuello estrecho contribuye asimismo a la disminución de la resistencia. La mayor fuente de resistencia en la natación sostenida, en contraste con la resistencia en la natación transitoria, es la resistencia al avance que proviene de la viscosidad del agua. La fuerza de resistencia viscosa depende de la tasa de distorsión del fluido. La tasa de distorsión es mayor en la capa límite: delgada capa de fluido inmediatamente adyacente a la superficie de cualquier cuerpo que se mueve a través de dicho fluido.

La fuerza de resistencia viscosa al avance es proporcional al cuadrado de la velocidad y al área superficial del cuerpo. La propulsión que depende de la flexión del cuerpo aumenta la fuerza de resistencia viscosa, porque el movimiento de los elementos propulsores incrementa su velocidad con respecto al fluido circundante (en comparación con los elementos correspondientes de un cuerpo rígido). Además, los movimientos propulsores modifican las pautas de flujo locales y aumentan la distorsión del fluido, que a su vez intensifica la fuerza de fricción.

Reducir la resistencia viscosa

Por acción de estos factores, la resistencia al avance de un objeto flexionante autopropulsado, así un pez, puede ser, en la cola, un orden de magnitud mayor que la resistencia al avance de un cuerpo rígido en la posición correspondiente. Si se suma la resistencia al avance a lo largo de todo el cuerpo, se encuentra que la resistencia media sobre el pez es de dos a cuatro veces mayor que la resistencia sobre un cuerpo rígido. La resistencia viscosa se reduce si se minimiza el área del cuerpo en movimiento. Además, la reducción es particularmente grande si el área mengua en la región situada frente a la cola, porque es allí donde el efecto del movimiento del cuerpo produce el mayor aumento de la resistencia al avance. Se favorece, por tanto, el diseño de cuello estrecho. Además, una sección caudal estrecha permite que la parte anterior del cuerpo sea más rígida y que el cuerpo sea fusiforme ("hidrodinámico"), lo que asimismo reduce la resistencia al avance.

La interacción entre los elementos propulsores en la natación periódica y los beneficios asociados con la reducción de la resistencia viscosa al avance sugieren que existe un diseño óptimo para los peces que emplean la natación sostenida. El diseño comprende un cuerpo rígido ligado mediante un grácil pedúnculo caudal a una cola alta y estrecha. El cuerpo es fusiforme: más alto en un punto que se halla entre un tercio y la mitad de la distancia que hay desde la cabeza a la cola, y se estrecha suavemente hasta la cola. Quizá la mejor aproximación al diseño óptimo para la natación sostenida sea la forma del atún. Una morfología similar se encuentra en los tiburones, delfines, ballenas e incluso en los ictiosaurios, un grupo de reptiles nadadores extinguidos. Todos esos animales presentan una especialización para la navegación rápida y eficaz.

Al igual que ocurre en los nadadores transitorios, se dan desviaciones del diseño locomotor óptimo entre los peces cuya forma de vida incluye la navegación. Las desviaciones más notables se observan en los tiburones. Aunque la mayoría de éstos dependen en gran parte de la navegación para vivir, sólo unos cuantos tienen el cuerpo conformado como el de un atún. La razón de esta divergencia estriba en que, a pesar de que sean ambos, tiburón y atún, peces navegantes, la mayoría de los tiburones tienen un modo de natación muy distinto del que caracteriza al atún. En realidad, parece que los movimientos natatorios comunes entre los tiburones son más parecidos a los de la anguila que a los del atún.

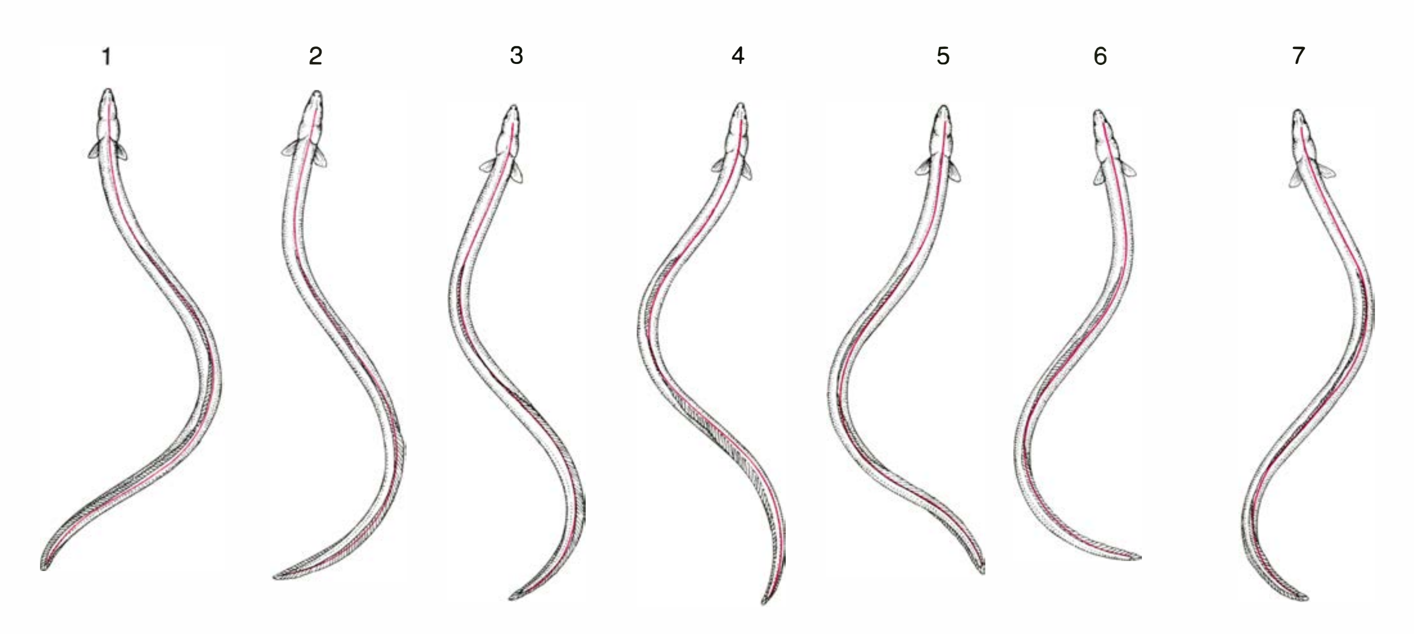
Sin embargo, el cuerpo de un tiburón es más fusiforme que el de una anguila. Además, mientras que ésta no posee aletas medias significativas, aquél presenta varias y de tamaño respetable. Las aletas medias insertas en la superficie dorsal del cuerpo son particularmente pronunciadas. Portan una gran aleta dorsal delantera y una aleta dorsal trasera algo menor. La extensión superior de la cola es también grande. Entre los tres apéndices dorsales existen amplios espacios.

La conjunción de los movimientos natatorios de los tiburones y los grandes espacios que se abren entre las aletas medianas reviste interés mecánico, porque cualquier aleta con un borde posterior afilado arrastra una estela detrás suyo. Además, debido al movimiento periódico de la natación sostenida, la estela sigue un camino sinusoidal.

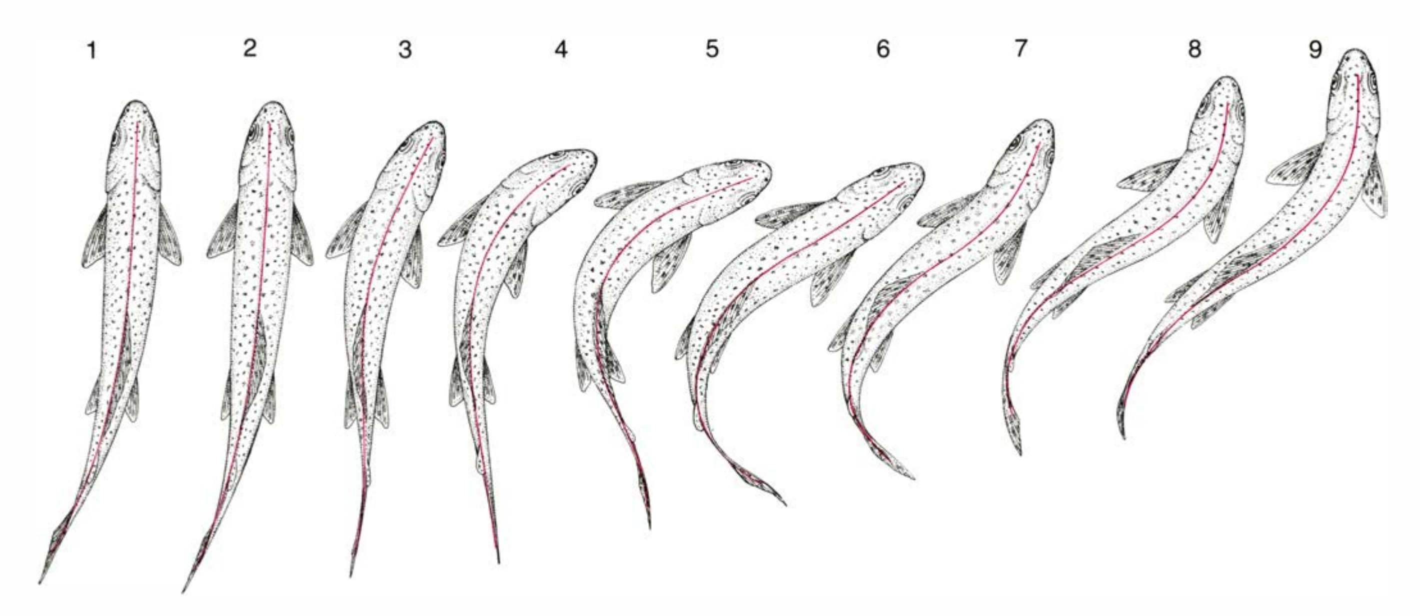
Las aletas del tiburón

Considérese la estela de la aleta del tiburón en un marco de referencia que tenga la misma velocidad que el pez y se mueva en la dirección en que éste avanza. La estela parecerá viajar corriente abajo, hacia la cola del pez. La velocidad de la estela con respecto al animal será igual a la de éste cuando lo mire un observador situado en el marco normal de referencia. La onda propulsora viaja asimismo hacia la cola, pero, como hemos visto, la velocidad de la onda propulsora es mayor que la del pez. Por viajar la onda propulsora más deprisa que la estela, se produce una diferencia de fase entre las dos trayectorias sinusoidales. Si el pez nada con ritmo uniforme, la diferencia de fase será constante en cualquier punto situado detrás de la aleta.

Considérese ahora una segunda aleta, más cerca de la cola que la prime-



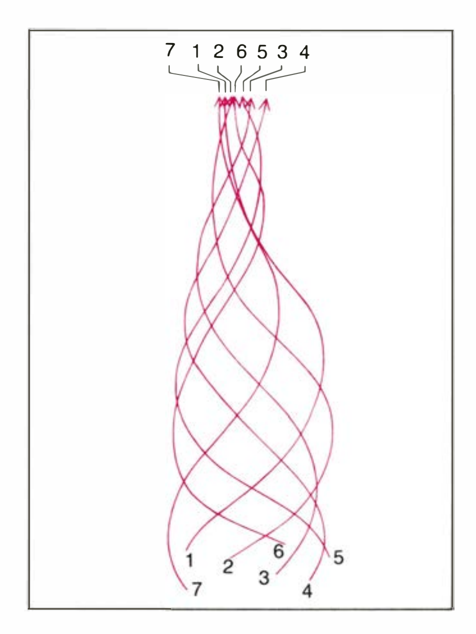
5. ANGUILA EN NAVEGACION; se curva en más de una longitud de onda completa al moverse a través del agua. En esta figura y en la 6, los dibujos numerados de la izquierda se tomaron de fotogramas impresionados a intervalos breves. El esquema de la derecha muestra la posición de la línea central del pez durante los movimientos de propulsión. En todos los tipos de natación en los que interviene el cuerpo y la aleta caudal, la onda propulsora recorre el cuerpo a una velocidad superior a la velocidad neta del pez con relación al agua. En la propulsión periódica, como la de la anguila en navegación, los



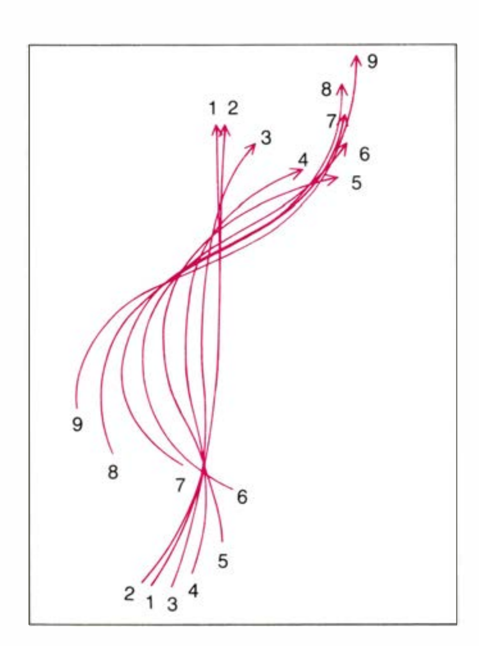
6. TRUCHA ACELERANDO; el pez dobla su cuerpo en lo que constituye sólo parte de una longitud de onda completa, al tiempo que aumenta la velocidad partiendo del reposo. En esta natación transitoria el movimiento propulsor global no se repite de forma cíclica. Como la mayoría de los nadadores

ra. Si en la segunda aleta la diferencia de fase entre la onda propulsora y la estela tiene la magnitud adecuada, la estela comienza a moverse hacia dentro, del mismo modo que la segunda aleta lo hace hacia fuera. Si ello es así, el empuje resultante del movimiento de la segunda aleta puede aumentar considerablemente. El efecto es aproximadamente análogo al de extender la mano para empujar una puerta giratoria, al tiempo que la puerta se empuja desde el otro lado.

Ocurre que la diferencia de fase mínima, es decir, la diferencia en la posición de las trayectorias sinusoidales que se precisa para obtener el efecto de aumento de empuje, es de 90 grados. Con Raymond Keyes, de Sea World, San Diego, estudié seis especies de tiburones de las instalaciones para seláceos de Sea World a fin de determinar si la diferencia de fase entre la estela de ataque y la aleta situada corriente abajo bastaba para que se produjera la interacción que aumenta el empuje. Encontramos que las seis especies nadaban de manera que la aleta anterior y la aleta posterior podían interactuar para aumentar el empuje.



movimientos son cíclicos. Los movimientos ondulatorios de la anguila fueron descritos por sir James Gray, en la década de 1930; gran parte de las investigaciones actuales se basan en sus trabajos.



de tipo transitorio, la trucha combina en su natación una salida rápida con un giro poderoso.

Una razón por la que los tiburones emplean mecanismos que aumentan el empuje en vez de la refinada especialización del diseño del atún es el material del que está compuesto el esqueleto del tiburón: éste no es óseo, sino cartilaginoso. Aunque el esqueleto se halla en muchos casos robustecido por materiales más fuertes, que contienen calcio, los miembros cartilaginosos no pueden soportar tanta combadura como el hueso de la mayoría de los demás peces. Ello explica por qué los pocos tiburones que semejan atunes no pueden nadar a la velocidad de estos últimos.

Las diferencias en morfología funcional entre tiburones y atunes reflejan diferencias de gran alcance en la ecología de los dos grupos de peces. James F. Kitchell, de la Universidad de Wisconsin en Madison, analizó la pauta de utilización de energía por parte de los atunes y concluyó que eran "especuladores de energía". Los atunes gastan una energía considerable al recorrer, sin aminorar su rauda velocidad, grandes distancias, en busca de presas y de lugares de reproducción. La natación continua y a alta velocidad se beneficia de la endotermia: la regulación interna de la temperatura corporal. Y a la inversa, la natación continuada y la endotermia requieren mucha energía en forma de alimento; de ahí que los atunes deban explorar el océano a una velocidad elevada y constante.

Tiburones: conservadores de energía

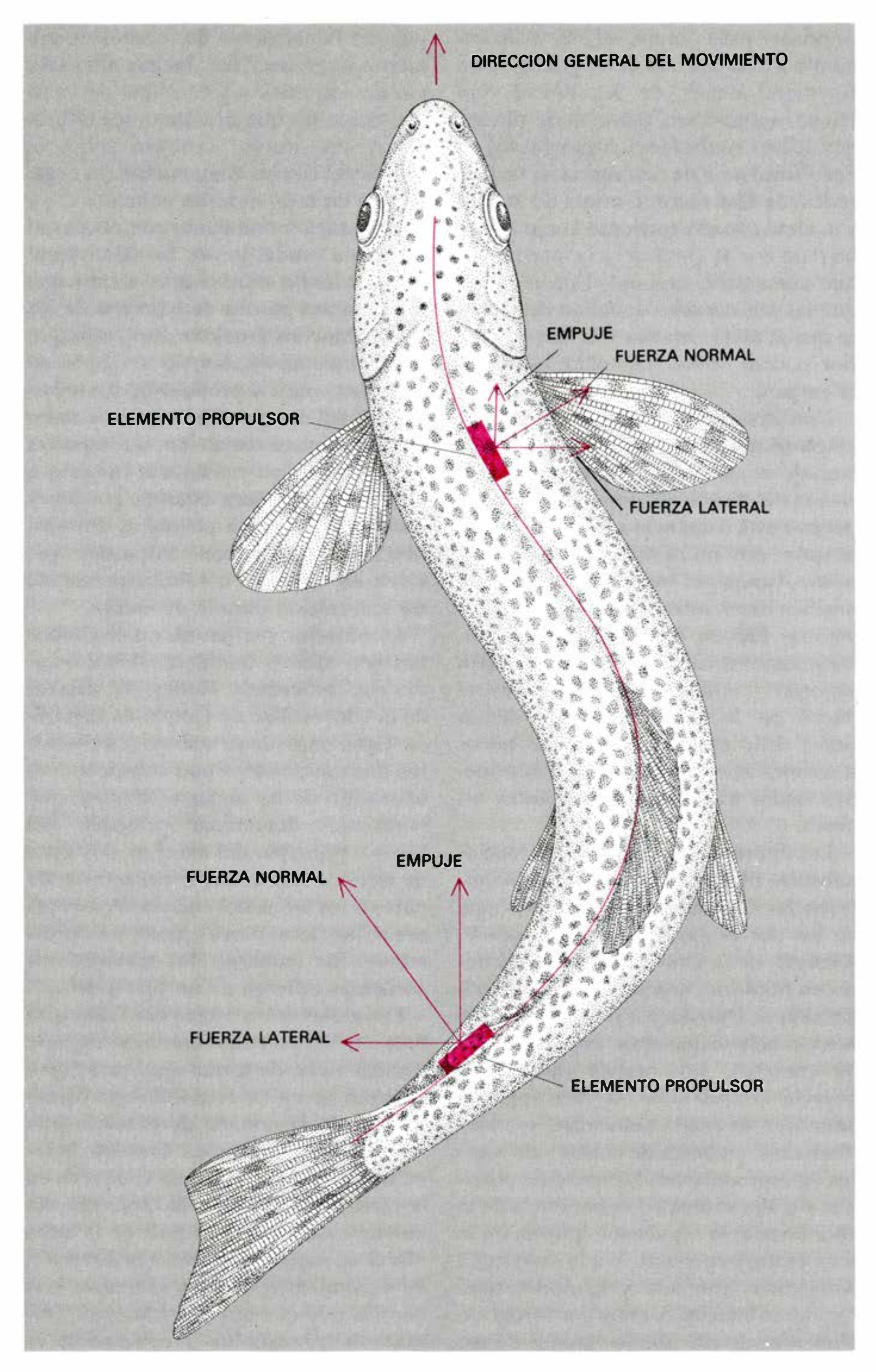
Los tiburones, en cambio, son mucho más conservadores en la gestión de sus recursos energéticos. Los tiburones raramente son endotérmicos. De hecho, su tasa metabólica es baja comparada con la de la mayoría de los demás peces. Detienen con frecuencia su marcha para descansar sobre el fondo. Sus reducidos requerimientos de energía les permiten ser depredadores oportunistas: parando y esperando pueden beneficiarse de fuentes de alimento impredecibles. Pautas alternativas de adquisición y consumo de energía, como las que presentan los tiburones y los atunes, influyen sobre la forma y el comportamiento de los organismos en todo el reino animal.

La natación ondulante con el cuerpo y la aleta caudal juntos ha sido objeto de un estudio mucho más atento que los restantes modos de natación de los peces. Muchos emplean, sin embargo, el movimiento oscilatorio de aletas de base corta para la propulsión, sin movimiento del cuerpo. Ese modo de natación es característico de las especies que se basan en maniobras precisas a baja velocidad para obtener comida y para esconderse en pequeños abrigos. Muchos de los peces tropicales que viven en arrecifes coralinos presentan especialización para la maniobra.

La natación oscilatoria no se conoce tan bien como la ondulante. En su estudio está empeñado Robert W. Blake, de la Universidad de Columbia Británica. Gran parte de su trabajo se refiere a los dos mecanismos que subyacen a la operación de las aletas oscilantes, que podríamos denominar principio del remo y principio del ala. Los dos tipos de aleta de base corta se encuentran en pares a los lados del cuerpo. Por lo general, las aletas pares operan simétricamente. Sin embargo, los movimientos oscilantes difieren de un tipo a otro.

Las aletas que actúan como remos se mueven horizontalmente hacia delante y hacia atrás, de forma muy parecida a como lo hacen los remos de una barca, alternando la remada de potencia y la remada de recuperación. Durante la remada de potencia, la aleta se mueve en la dirección opuesta a la dirección del movimiento global. La pala de la aleta ofrece su parte más ancha a la dirección de movimiento del pez y se mueve más deprisa que el cuerpo del animal. Durante la remada de recuperación la aleta se mueve en la misma dirección que el cuerpo. La boga de potencia genera gran fuerza de resistencia al avance, que puede orientarse para impulsar al pez en la dirección que éste elija. En la boga de recuperación no se genera empuje y la pala de la aleta se añade a la resistencia que retarda el movimiento del pez a través del agua. La resistencia que proporciona la aleta en la recuperación se reduce plegando la pala de la misma y girándola para que se sitúe en paralelo al flujo de agua.

La forma de la aleta tiene una influencia considerable en la cantidad de empuje que puede rendir la pala. Imagínese la aleta dividida en estrechas



7. EL EMPUJE LO GENERAN los elementos propulsores: pequeños segmentos del cuerpo. Se ilustran aquí las fuerzas que actúan sobre dos elementos propulsores. A medida que pasa la onda propulsora, cada elemento se mueve lateralmente y acelera el agua situada en las inmediaciones. El elemento está inclinado hacia la cola, y en esa dirección se acelera el agua. La fuerza normal, igual y opuesta a la fuerza que se ejerce sobre el agua, presiona contra el elemento propulsor. Se subdivide la fuerza normal en dos componentes principales: la fuerza lateral, perpendicular al movimiento global del pez, y el empuje, paralelo al movimiento global. El empuje combinado de todos los elementos propulsores impele al pez.

bandas, como los elementos propulsores empleados en el análisis de la propulsión ondulatoria. La contribución de cada pala unitaria al empuje es proporcional al área de la misma y al cuadrado de su velocidad relativa (la velocidad media con respecto al cuerpo).

Las palas unitarias más alejadas del cuerpo (las que se encuentran al extremo de la aleta) atraviesan la mayor distancia durante la boga de potencia. Esos elementos aportan la mayor contribución al empuje. De hecho, los elementos cercanos a la base de la aleta se mueven a veces tan lentamente que en realidad generan resistencia en lugar de empuje. De ahí que la forma óptima para una aleta que opere como un remo sea un triángulo con el ápice en la base de la aleta.

Aletas que son como alas

Mientras que a un bote de remos lo impulsa una fuerza de resistencia, el ala de un avión eleva al aparato mediante una fuerza ascensional. Diferencia en la fuerza propulsora que exige un distinto diseño de las aletas que actúan como remos y las que funcionan como alas. Cuando una aleta de tipo remo se mueve, el empuje se genera en el mismo plano que el de movimiento de la pala de la aleta. La ascensión, en cambio, se genera en un plano perpendicular a la dirección del movimiento: cuando un avión se desplaza por el aire, la ascensión es vertical aunque el ala se mueva en sentido horizontal.

Por ello, para impulsar al pez hacia adelante, una aleta ascensional debe moverse hacia arriba y hacia abajo en un plano aproximadamente perpendicular al eje longitudinal del cuerpo del pez. Puesto que la ascensión se genera a ángulos rectos con respecto al plano de la aleta, no se precisa boga de recuperación. Las aletas generan ascensión en el golpe hacia arriba y en el golpe hacia abajo.

Como ocurre con la resistencia al avance, la ascensión es proporcional a la superficie de la aleta y al cuadrado de la velocidad de la misma. Sin embargo, la fuerza ascensional puede ser de un orden de magnitud superior que la fuerza de resistencia generada por una aleta de la misma área. Determinan tales factores que el empuje proporcionado por las aletas que actúan por ascensión es mayor y más continuo que el empuje proporcionado por las aletas que actúan por resistencia al avance. De ahí que los nadadores oscilantes más veloces tengan aletas que funcionan como alas; entre ellos se cuentan la perca de rompiente, los tordos y el pez luna. En contraste con las aletas que actúan como remos, las que funcionan como alas no están limitadas en su localización a los lados del cuerpo; pueden situarse asimismo en las caras ventral y dorsal.

La forma de una aleta que genera ascensión tiende a ser distinta de la forma de una aleta que genera resistencia. Se explica en parte por la necesidad de minimizar el flujo cruzado, que es el flujo alrededor de la punta de la aleta. La

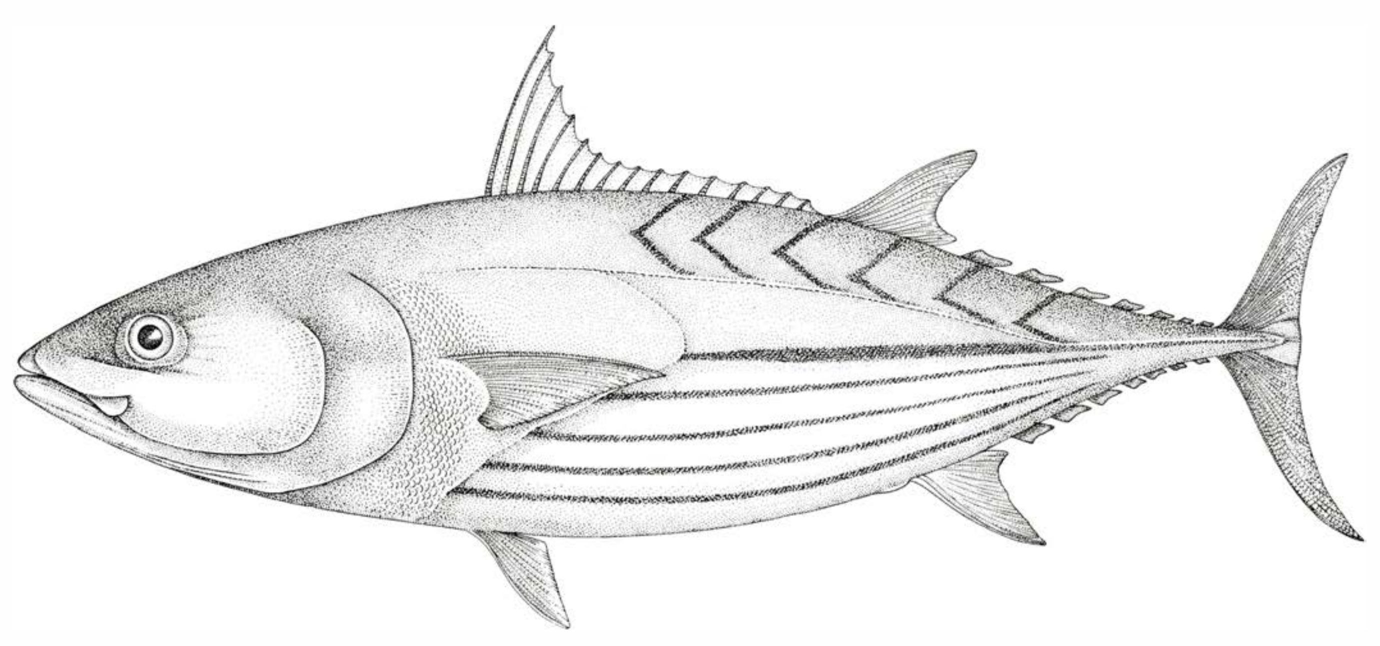
misma pauta se observa en el aire que fluye alrededor de la punta del ala de un avión. En ambos casos, el flujo cruzado conduce a una disminución de la ascensión y a un aumento de la resistencia al avance.

Los diseñadores de aviones minimizan el flujo cruzado haciendo la punta del ala lo más estrecha posible. Ello se consigue generalmente afilando el ala desde la base a la punta. Una aleta no puede afilarse a lo largo de toda su longitud, porque necesita una base estrecha para poder oscilar libremente. Por ello, las aletas ascensionales tienden a ser romboidales, con un aguzamiento en el extremo conectado al pez y otro en el extremo externo.

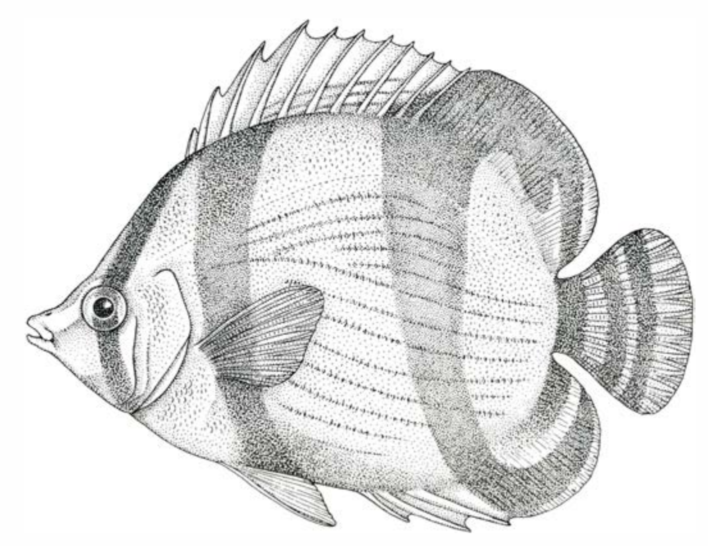
Las aletas oscilantes y las ondulantes de larga base sirven para la natación lenta y la maniobra precisa en hábitats estructuralmente complejos, como las praderas de macrófitos y los arrecifes de coral. En tales ambientes, los peces se esconden en pequeños abrigos y arrancan el alimento de las superficies donde éste crece o se ha instalado. Las superficies se orientan en todas direcciones, de modo que para llegar con la boca al lugar adecuado el pez debe emitir pequeños impulsos propulsores con considerable precisión.

Ello implica unas aletas flexibles, dotadas de la capacidad de doblarse y girar de forma precisa en varias direcciones. Además, para la natación lenta y las maniobras delicadas parece que determinadas formas generales del cuerpo son mejores que otras. Los peces que tienen éxito en ambientes geométricamente complejos tienden a tener el cuerpo aplanado lateralmente, con el perfil de un disco o un rombo.

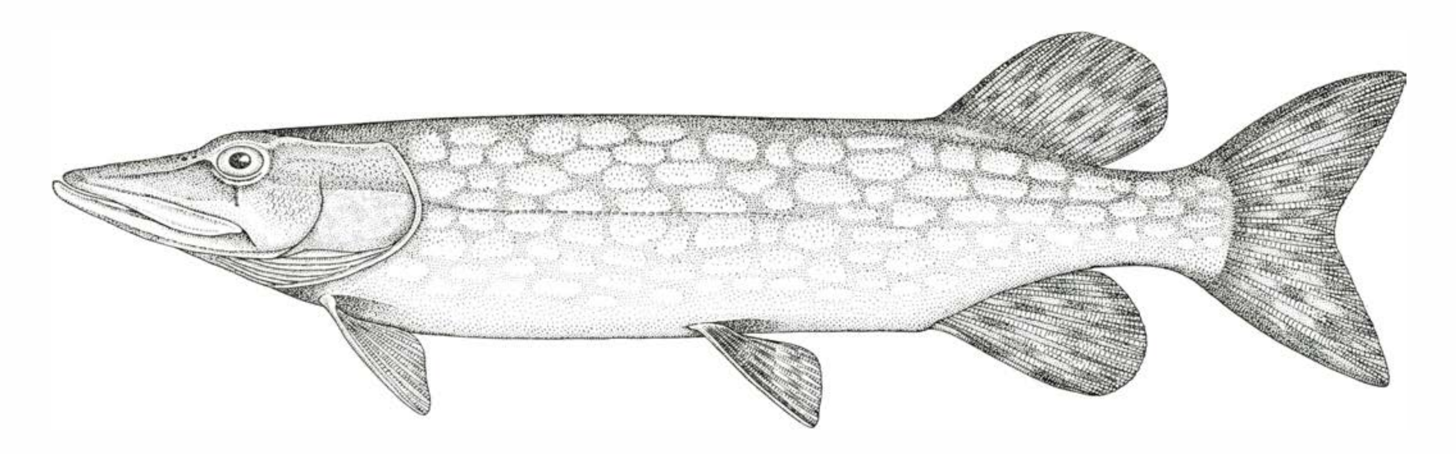
Estas formas ofrecen la menor resistencia a la rotación en el plano vertical medio del cuerpo. Además, muchos peces arrecifales bien adaptados tienen aletas superiores e inferiores que se ex-



8. LISTADO; este túnido es un navegante magnífico cuyo diseño se acerca al óptimo para la natación periódica. Tiene un cuerpo rígido de forma "hidrodinámica", más alto a medio camino entre la cabeza y la cola. La aleta caudal, alta y estrecha, genera un fuerte empuje; se inserta en el cuerpo mediante un delgado pedúnculo. Tal diseño sirve para maximizar el empuje al tiempo que reduce la fuerza de resistencia al avance. (Dibujos de Patricia J. Wynne.)



9. PEZ MARIPOSA DE BANDAS; tiene un diseño que se acerca al óptimo para maniobrar a bajas velocidades. El cuerpo housediforme es bastante corto, lo que facilita los movimientos de rotación en el plano vertical medio. Las aletas oscilantes que proporcionan la fuerza propulsora se distribuyen alrededor del centro de la masa corporal, de manera que en cualquier plano pueden ejercerse empujes pequeños y precisos. Tal forma tiene considerables ventajas para el pez en hábitats geométricamente complejos, como el arrecife de coral, donde viven muchos especialistas de la maniobra a bajas velocidades.

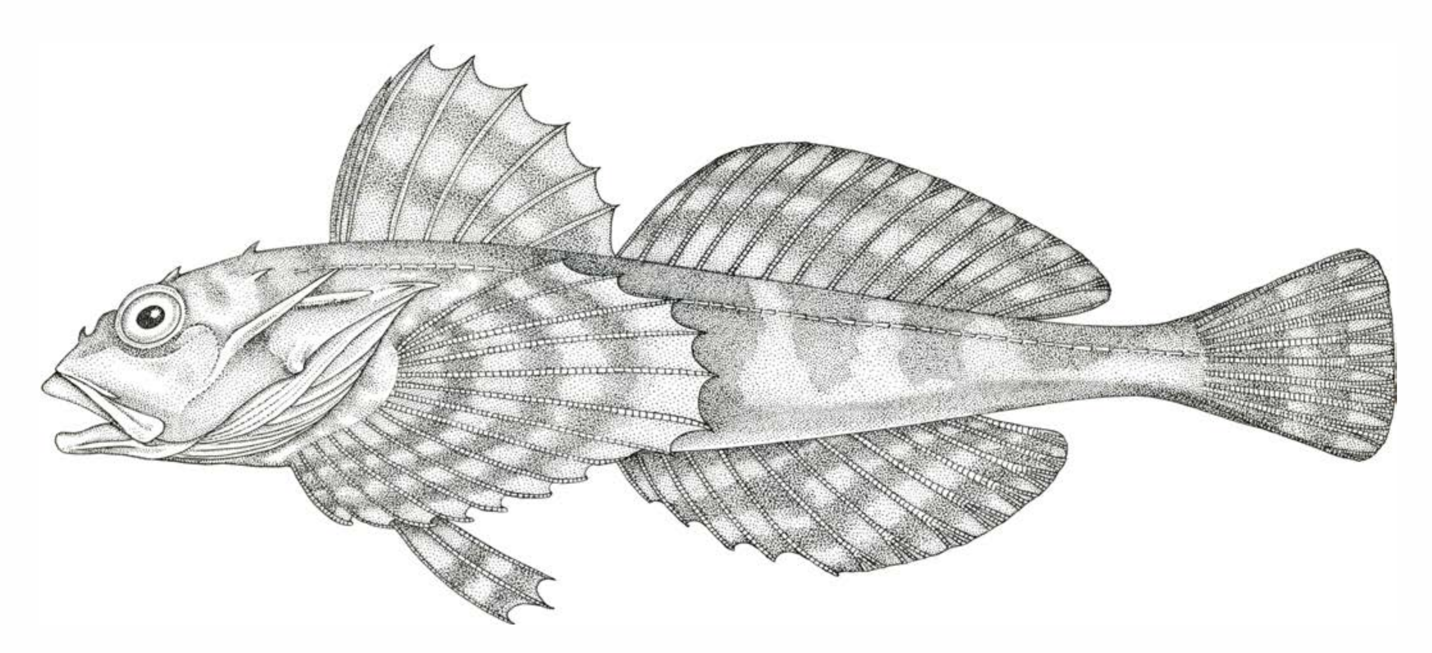


10. EL LUCIO es un especialista en aceleración. En la natación transitoria la resistencia procede sobre todo de la inercia. La relación entre inercia y magnitud de la fuerza propulsora se reduce si la componente no muscular de la masa del cuerpo es lo más pequeña posible: el lucio tiene una masa corporal que es músculo en un 60 por ciento. El cuerpo largo y grácil del lucio se dobla en una onda de gran amplitud, lo que es ventajoso para acelerar. La silueta de un lucio vista lateralmente es alta cerca de la cola, lo que se traduce en un empuje considerable en las acometidas rápidas a un pequeño pez presa. Sin embargo, cerca de la cabeza la silueta es baja. El autor ha determinado que la sección lateral redondeada cerca de la cabeza ayuda al lucio a cazar.

tienden más allá del segmento ahusado de la parte posterior del cuerpo. Presentan aletas pectorales pares en la parte alta del cuerpo y aletas pélvicas pares en la parte baja. Así, los apéndices propulsores se distribuyen alrededor del centro de masa del cuerpo y el empuje puede dirigirse en cualquier plano. Los peces mariposa son un ejemplo de peces de arrecife poseedores de tal diseño óptimo para la maniobra. Los peces con esa morfología tienden a desplazar a otras especies en hábitats en los que la maniobra precisa constituye una ventaja.

Mi análisis de los tres diseños locomotores básicos (para la natación transitoria, la natación sostenida y la maniobra) sugiere una conclusión fundamental: no pueden combinarse todas las características óptimas para los distintos tipos de natación en un único pez. A este principio lo llamo de la exclusión mutua de los diseños óptimos. El trabajo teórico y experimental muestra que los elementos de diseño que favorecen el mejor rendimiento en la natación transitoria y los elementos que favorecen la mayor eficacia en la natación periódica se excluyen mutuamente. Existen, además, buenas razones para pensar que el diseño óptimo para la maniobra excluye los elementos que favorecen el máximo rendimiento en la aceleración o en la carrera y la navegación.

El pez mariposa, un especialista de la maniobra, no podría funcionar de manera óptima en natación transitoria ni en natación periódica. Durante la propulsión periódica la gran superficie de su cuerpo y aletas impone un alto precio en incremento de la resistencia. En su breve cuerpo queda poco espacio para la musculatura, por lo que hay un



11. EL CHARRASCO es un especialista en aceleración, con un diseño que produce el máximo empuje. La silueta de un charrasco vista lateralmente es bastante alta. Las aletas de las superficies superior e inferior aumentan el área de la silueta, con lo que producen el mayor empuje en la natación transitoria. El cuerpo es largo y flexible: el pez puede doblarse en una onda de gran amplitud. Sin embargo, la masa no muscular del charrasco no es pequeña. Su cuerpo tiene únicamente alrededor de un 30 por ciento de músculo, lo que supone que en arrancadas rápidas la fuerza propulsora es pequeña si se compara con la resistencia inercial. Se explica en parte el aumento de la inercia por la forma de la cabeza. La cabeza es grande y pesada, con una geometría ventajosa para alimentarse de animales del fondo. Así, el diseño óptimo para la natación transitoria tiene que avenirse con factores no locomotores.

peso muerto considerable, que afecta al rendimiento de la arrancada rápida. Además, con este tipo de cuerpo, los movimientos de gran amplitud que se precisan para la aceleración rápida son difíciles de ejecutar.

A la inversa, los peces especialistas en la natación con el cuerpo y la aleta caudal no son particularmente adeptos a la natación lenta y a la maniobra. Los nadadores periódicos tienen aletas rígidas que sirven de quillas para la estabilidad e hidroplanos para regular su profundidad en el agua; estas aletas rígidas no sirven para proporcionar los empujes pequeños y precisos que se precisan en la maniobra a baja velocidad. El cuerpo alargado del especialista en natación transitoria reduce su capacidad de girar en hábitats de geometría compleja.

El plano de la morfología funcional

De cuanto llevamos expuesto se deduce la existencia de tres diseños óptimos básicos para la natación, que se excluyen mutuamente entre sí. Pero sería ingenuo concluir que todos los peces deban acomodarse a uno de los tres. Hasta el examen más superficial de la forma muestra que la mayoría posee diseños locomotores con una combinación de los elementos del diseño de los especialistas. De ahí que la mayoría de los peces sean generalistas y no especialistas en cuanto a la locomoción.

Tales generalistas funcionan claramente mejor que cualquier especialista en los dos grandes tipos de natación que el especialista sacrifica para obtener un rendimiento elevado. No obstante, ningún generalista puede funcionar con la perfección del especialista en el dominio de éste. Por tanto, y a pesar de que pocos peces se acercan al diseño óptimo para una determinada función natatoria, el principio de los tres diseños básicos no resulta invalidado. Antes bien, cabe considerar que los tres diseños fundamentales definen un plano de morfología funcional locomotora con forma de triángulo.

La mayoría de los peces puede ubicarse en el plano de morfología funcional, en una posición que depende de la particular combinación de elementos de diseño especializados que cada pez presenta. Sin embargo, algunos no pueden disponerse en este plano. Entre ellos se cuentan aquellos peces cuyo modo de vida relega la natación a un papel secundario, como el rape, que vive a cierta profundidad y fía en la succión bucal para capturar sus presas.

Si se trazan líneas rectas que corten el plano triangular desde los especialistas, en los vértices, hasta los generalistas, en el centro, las líneas atraviesan grupos de peces cuyas cualidades natatorias se hallan dispuestas en una serie continua que encuentra su base en las diferencias entre los recursos que explotan. Una de esas pautas se ilustra en la tasa de éxitos de la arremetida a la presa. El atún, en un vértice del triángulo, captura del 10 al 15 por ciento de los peces a los que acomete. La razón es que el diseño especializado del atún, que es excelente para navegar, limita la aceleración y la maniobrabilidad. Sin embargo, al navegar extensamente a gran velocidad, puede aumentar el número de presas que encuentra y con ello multiplicar el número de acometidas que realiza.

Cualidades de los generalistas

Como hemos visto, los peces cuya forma es como la del lucio, que se encuentran en otro vértice del triángulo, capturan del 70 al 80 por ciento de las presas a las que acometen. Sin embargo, puesto que el lucio no puede navegar, debe esperar a la presa, lo que limita el número de presas que encuentra y el número de acometidas que puede realizar. Los peces como las truchas y las percas americanas, con forma intermedia entre la del lucio y la del atún, son también intermedios en el índice de acometidas con éxito. Estos generalistas llegan a capturar del 40 al 50 por ciento de los peces a los que atacan; su carácter generalista les faculta para navegar a la búsqueda de presas. Sus compromisos en el diseño les abren oportunidades de alimentación que están cerradas a los especialistas.

El enfoque biomecánico que se da a la biología de los peces ha esclarecido aspectos de la vida de estos animales que difícilmente podrían haberse interpretado de ningún otro modo. En consecuencia, pueden correlacionarse medidas precisas de eficacia en el agua con la manera de nadar y su modo de vida. Una buena prueba para un modelo científico acertado es que conduzca a nuevos conocimientos que podrían haberse pasado por alto en ausencia del modelo. La importancia de los modelos hidromecánicos en la comprensión de la vida de los animales acuáticos es un ejemplo de lo indicado. De manera general, muestra el papel que la biomecánica puede tener a la hora de dilucidar rompecabezas biológicos fundamentales.

Estrellas simbióticas

Las observaciones desde satélites han revelado que ciertos objetos celestes con un espectro peculiar constan de una estrella gigante roja rodeada de una nebulosa pequeña y densa, calentada por una estrella compañera

Minas Kafatos y Andrew G. Michalitsianos

El proceso de creación de nuevas estrellas a partir de nubes de polvo y gas parece producir estrellas únicas y estrellas dobles en igual número, aproximadamente. Las estrellas nacidas en parejas giran una alrededor de la otra, en órbitas ligadas gravitatoriamente, a lo largo de toda su evolución. Si entre ellas media una larga distancia, la interacción mutua puede ser despreciable. Por contra, cuanto más próximas estén, mayor será el efecto sobre su evolución, y tanto más probable será que la radiación que emiten muestre características que las distinguen de las estrellas comunes y corrientes.

Entre los cientos de millones de sistemas binarios que se estima existen a menos de 3000 años-luz del sistema solar, resultando por tanto teóricamente detectables en las fotografías de exploración del cielo, una pequeña fracción, de no más de algunos centenares, pertenece a una curiosa subclase, cuya radiación tiene una distribución de longitudes de onda muy peculiar, tanto que se ha resistido a cualquier explicación durante largo tiempo. Tales sistemas radian intensamente en la región visible del espectro; parte de ellos lo hacen con intensidad todavía mayor a ambos lados de dicha franja: en la región ultravioleta y en las regiones infrarroja y de radio.

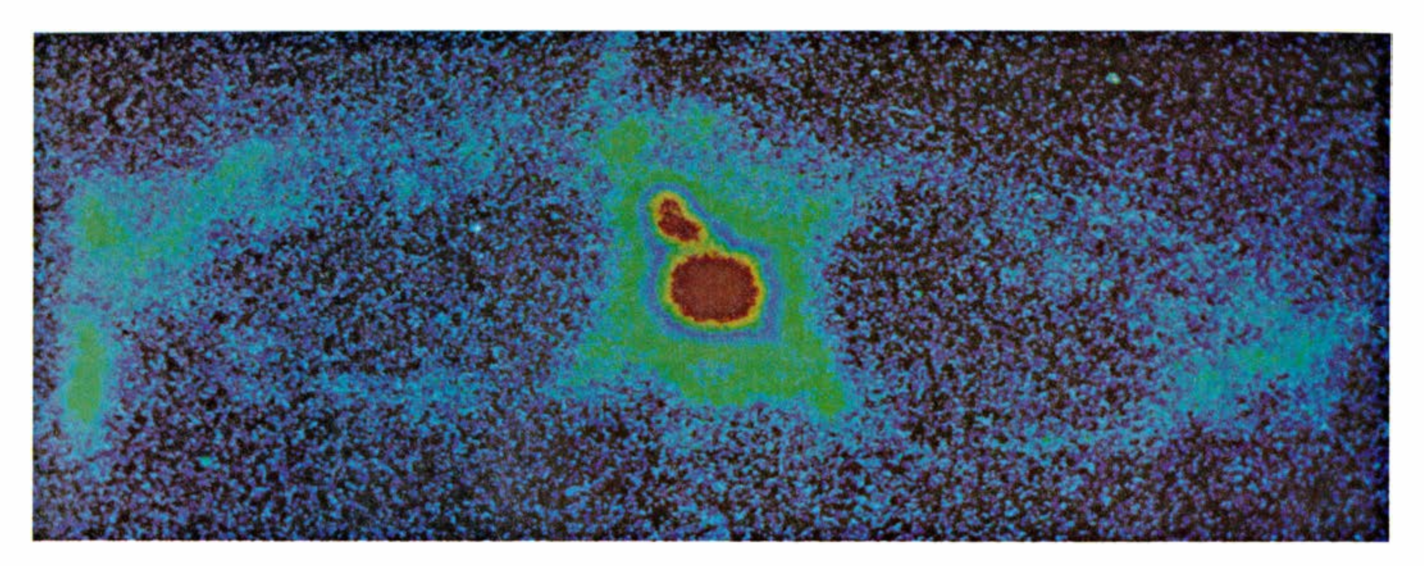
Esta extraña distribución de radiación halla explicación en el emparejamiento de una estrella gigante roja y fría con una estrella pequeña y ardiente que está prácticamente en contacto con su compañera mayor, mientras ambas describen órbitas alrededor de un centro común. Se trata de las llamadas estrellas simbióticas. En las placas fotográficas sólo se pueden discernir las estrellas gigantes, pero las pruebas de la existencia de una compañera caliente han sido recientemente suministradas por instrumentos a bordo de satélites, capaces de detectar radiación ultravioleta a longitudes de onda absorbidas por la atmósfera terrestre (y, por tanto, no detectables con los instrumentos instalados en la superficie de nuestro planeta). Se acaba de observar dos sistemas de estrellas simbióticas, los primeros en detectarse fuera de nuestra galaxia, en la Gran Nube de Magallanes, una de las galaxias satélites asociadas con la nuestra.

Los espectros de las estrellas simbióticas indican que la gigante roja fría está rodeada de un gas ionizado muy caliente. La existencia de gas ionizado constituyó la peculiaridad de esos objetos, decenios antes de que las observaciones de satélites lograran identificar la fuente ionizante como la radiación procedente de una compañera caliente e invisible. Las estrellas simbióticas han mostrado también fulguraciones, lo que indica expulsión de materia en forma de capa o anillo, reminiscencia de las recurrentes explosiones de una nova. Las estrellas simbióticas pueden, por tanto, representar una fase transitoria en la evolución de ciertos tipos de sistemas binarios donde se produce una apreciable cesión de materia por parte de la compañera mayor a la menor. Parece probable que, en el curso de la cesión de materia, se forme frecuentemente un disco alrededor de la compañera más pequeña. Sin embargo, en un caso al menos, una estrella simbiótica ha expulsado materia en forma de chorro fuertemente direccional, que recuerda otros chorros, mucho mayores, asociados con galaxias activas y quasars.

El término simbiótico fue aplicado a esos peculiares sistemas por Paul W. Merrill, quien, con Milton L. Humason, los estudió en el Observatorio del Monte Wilson en los años treinta y cuarenta. Auténtico ejemplo de presciencia, pues no se conocía, en aquel entonces, indicaciones convincentes de la existencia de una estrella compañera, caliente y pequeña. Merrill lo aplicaba a una clase particular de objetos cuyo espectro, en las longitudes de onda visibles y del infrarrojo cercano, sugería la presencia de una estrella gigante roja y fría, de unas 200 veces el radio solar, rodeada por un gas caliente y enrarecido. Como una gigante roja, con una temperatura en superficie de unos 2500 grados Kelvin, sería incapaz de elevar la temperatura del gas circundante a un valor mucho mayor, Merrill sospechó la presencia de una conpañera invisible, mucho más caliente.

También por su cuenta, Alexander A. Boyarchuk, del Observatorio Astrofísico de Crimea, y Jorge Sahade, del Instituto Argentino de Radioastronomía, propusieron, hace 15 años, un modelo formal de las estrellas simbióticas como sistemas binarios. En este modelo, una gigante roja fría y una estrella caliente y compacta coexisten formando un sistema binario, rodeado por una densa y pequeña nebulosa de gas ionizado. Los espectros registrados por los instrumentos del satélite Explorador Ultravioleta Internacional (IUE) confirman el modelo binario. Pero hay astrónomos que no están convencidos del todo. Arguyen que los estados de ionización observados en la envoltura de gas no provienen de un objeto binario, sino de uno sencillo. En lo que sigue, adoptaremos la interpretación binaria.

De los datos obtenidos en exploraciones espectrales realizadas con instrumentos de base en tierra por Nicholas Sanduleak y C. Bruce Stephenson, de la Universidad Case Western Reserve, Lloyd R. Wackerling, de la Northwestern University, y Karl G. Heinze, del Centro de Vuelos Espaciales Johnson de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), se deduce la existencia de unas 20.000 estrellas simbióticas en nuestra galaxia, de las que algunos centenares –las alojadas a menos de 3000 años-luz– son accesibles a la observación. Y no puede



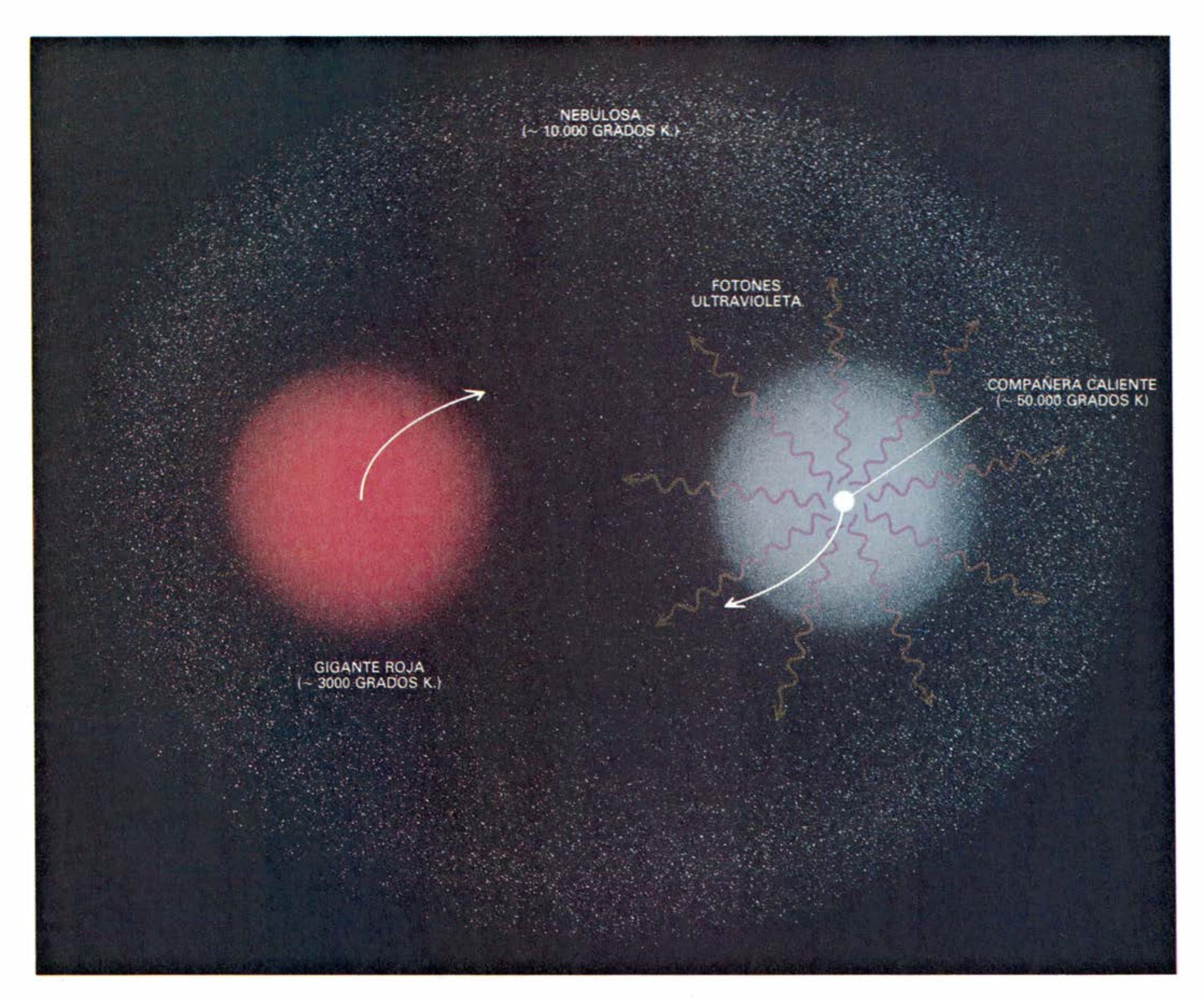
1. SISTEMA SIMBIOTICO R DEL ACUARIO y su peculiar chorro, en una imagen en falso color obtenida de una placa fotográfica realizada con el telescopio de tres metros del observatorio de Lick, por George H. Herbig, de la Universidad de California en Santa Cruz. Se cree que R del Acuario consta de una gigante roja fría y una compañera caliente invisible, cuya radiación ioniza la compacta nebulosa que rodea a la gigante roja, haciéndola resplandecer.Las dos estrellas giran una alrededor de la otra, en una órbita elíptica con un período de 44 años. En el punto de máxima cercanía entre ellas se sospecha una brusca cesión de materia desde el cuerpo mayor hacia el menor. La interacción entre esa masa y el gas nebular explicaría el chorro que se ve, en forma de burbuja, extendiéndose desde la parte superior izquierda. La totalidad del sistema queda encerrada en el interior de una nebulosa lenticular que puede ser el resto de una fulguración semejante a una nova, registrada por los observadores japoneses en el 930 de la era cristiana. El tratamiento de la imagen fue realizado por Daniel A. Klinglesmith III, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional de Aeronáutica.

2. RADIOIMAGEN DE R DEL ACUARIO que resuelve el chorro que parte de la gigante roja en dos burbujas; fue realizada mediante el radiotelescopio de gran distribución de Socorro, Nuevo México, por los autores y Jan M. Hollis, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. El mapa, en clave de colores, representa la radioemisión de R del Acuario a una longitud de onda de seis centímetros. La escala del radiomapa es 5,5 veces mayor que la escala de la imagen fotográfica. La separación entre la estrella central y la burbuja más distante es de unos 0,01 años-luz. Si la burbuja fue expulsada de la estrella central entre 1970 y 1977, como se sospecha, su velocidad se hallaría comprendida entre los 800 y los 1800 kilómetros por segundo.

avanzarse una estimación más precisa por la disparidad que reina entre los espectroscopistas sobre los criterios de clasificación. Ahora bien, los instrumentos a bordo de satélites proporcionan más observaciones en la región ultravioleta lejana; por cuya razón, los espectros de los verdaderos sistemas simbióticos se distinguen con cierta facilidad de los correspondientes a estrellas peculiares que, en las observaciones realizadas desde el suelo, parecen similares.

Las estrellas gigantes frías son muy luminosas: su emisión domina por completo la del sistema simbiótico en la porción visible del espectro. Una gigante roja se dilata hasta un tamaño prodigioso cuando la estrella, inicialmente del tamaño del Sol, agota la provisión de hidrógeno disponible en el núcleo para la combustión termonuclear. En ese momento, el interior de la estrella se ha vuelto tan caliente que la combustión termonuclear se extiende a la capa que rodea al núcleo; y provoca la dilatación de las capas más externas de la estrella. Cuando la dilatación de la estrella multiplica ya por 50 o más veces su tamaño original, su luminosidad crece por cientos. En el curso de la expansión, la temperatura en superficie acaba por alcanzar los 2500 grados Kelvin; la estrella brilla entonces con un resplandor rojo anaranjado. La energía que proporciona calor a la envoltura exterior se produce en una capa que quema hidrógeno en el borde del núcleo. La alta luminosidad de la estrella se explica por su gran tamaño. La luminosidad decrece según la cuarta potencia de la temperatura de la superficie y aumenta con el cuadrado del radio: la disminución de la temperatura queda más que compensada con el aumento del radio.

La tenue envoltura fría de la estrella gigante emite la mayor parte de su energía en las regiones visible e infrarroja del espectro, de acuerdo con la curva correspondiente a la emisión de un cuerpo negro (un perfecto emisor y absorbente de energía) a una temperatura de 2500 grados Kelvin. La curva de emisión disminuye exponencialmente al decrecer la longitud de onda, hasta que, en la región por debajo de la longitud de onda de 3500 angstrom, en el extremo azul del espectro, la emisión



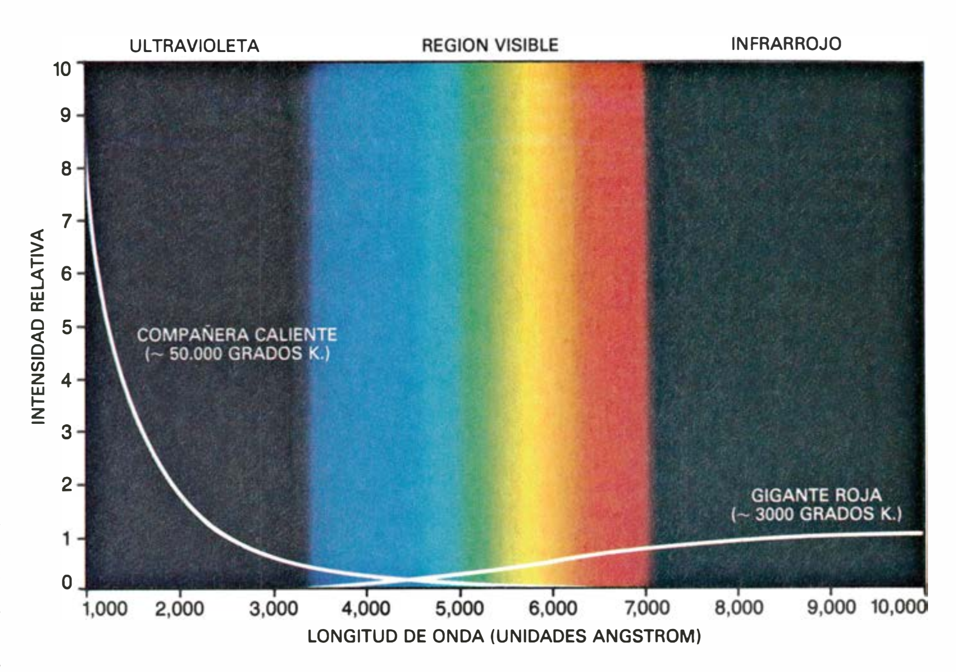
3. MODELO DE SISTEMA SIMBIOTICO que ilustra cómo la estrella gigante roja fría está inmersa en una nebulosa cuyos átomos han sido ionizados (despojados de uno o más electrones) por la radiación de alta energía que procede de la compacta y caliente estrella compañera. La nebulosa está constituida por gases expelidos por la gigante roja en forma de viento estelar. El radio de la estrella gigante es, al menos, de 50 a 100 veces el radio del Sol; su tenue envoltura externa llega cerca de su pequeña compañera, en órbita en torno suyo. La ionización de la nebulosa explica las muchas líneas de emisión que caracterizan los espectros de los sistemas simbióticos en la región visible y en la región ultravioleta del espectro. Esta versión del modelo representa el sistema simbiótico durante una fase tranquila, situación en la que las líneas de emisión del espectro muestran unos perfiles estrechos y bien definidos.

de la gigante roja resulta ya a duras penas detectable.

La supuesta estrella compacta, compañera de la gigante roja, tiene una temperatura superficial entre 50.000 y 100.000 grados Kelvin. La emisión de cuerpo negro de tal objeto crece continuamente al decrecer la longitud de onda, culminando en una emisión máxima en el ultravioleta extremo, a una longitud de onda por debajo de 1100 angstrom. Los instrumentos a bordo de satélites, capaces de realizar observaciones en el ultravioleta extremo, han permitido investigar las propiedades de emisión de la estrella compañera caliente. La radiación de la estrella fría luminosa que enmascara la radiación de la compañera caliente en observaciones realizadas desde el suelo es, a su vez, enmascarada en el ultravioleta.

Los espectros de luz visible de estrellas simbióticas distinguíanse de los espectros de otras estrellas por la emisión procedente de átomos de hidrógeno excitados, a longitudes de onda que variaban desde la línea alfa del hidrógeno, a 6536 angstrom en el rojo, hasta la línea delta del hidrógeno, a 4102 angstrom en el azul. Muchos espectros de estrellas simbióticas ofrecen también líneas de emisión de átomos más pesados, múltiplemente ionizados, es decir, despojados de dos o más electrones. Tales líneas de emisión, que no aparecen en el espectro de las gigantes rojas normales, caracterizan los espectros de las nebulosas planetarias: una estrella caliente rodeada por una capa o anillo de gas luminoso. Además, muchos espectros de estrellas simbióticas presentan bandas oscuras, lo que significa una absorción por moléculas en la dilatada atmósfera exterior de la estrella fría.

En los primitivos espectros de estrellas simbióticas registrados por Merrill, las bandas de absorción moleculares mostraban una configuración en dientes de sierra. Esto puede atribuirse a transiciones no discriminadas entre estados de energía de determinados compuestos (óxido de titanio, óxido de vanadio, monóxido de carbono y, en algunos espectros, incluso vapor de agua). Los compuestos se forman en la atmósfera de la estrella gigante; absorben o difunden fotones en el espectro continuo (diferente del espectro de líneas) de la radiación emitida por la estrella. La absorción molecular es responsable destacado de los muchos dientes de sierra observados en el espectro continuo de la estrella simbiótica Z de Andrómeda, considerada como prototipo de su clase; esta estrella ha sido examinada recientemente, en detalle, en el ultravioleta por Roberto Viotti, del Instituto de Astrofísica Espacial de Frascati, en Italia, y sus colaboradores.

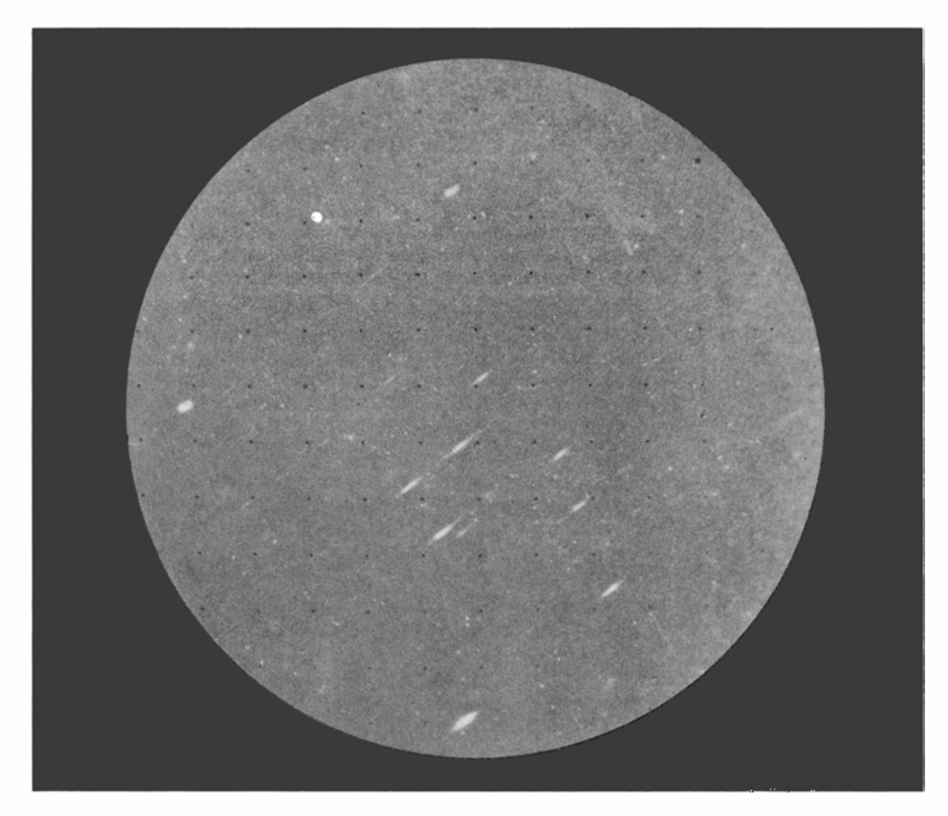


4. DISTRIBUCION DE LONGITUDES DE ONDA emitidas por las dos estrellas que componen un sistema simbiótico, en esquema. Distribución que se resistiría a la explicación, si las observaciones se limitaran a la región visible del espectro, a longitudes de onda entre 3400 y 7000 unidades angstrom. Si el objeto emisor fuera sólo una estrella gigante roja, con una temperatura superficial de 3000 grados Kelvin, su emisión caería a cero a longitudes de onda inferiores a los 4000 angstrom. El ligero ascenso por debajo de los 4000 angstrom constituye la única indicación de la existencia de una compañera caliente con una temperatura de 50.000 grados Kelvin. Para investigar la región ultravioleta, donde la emisión de la estrella caliente aumenta sin cesar, hasta un máximo por debajo de los 1000 angstrom, es necesario realizar observaciones desde un satélite fuera de la atmósfera terrestre. Observaciones que ha efectuado el Explorador Ultravioleta Internacional. La curva supone que ambas estrellas brillan por igual.

A causa del enorme radio de una gigante roja, la atracción gravitatoria en su superficie es pequeña, aproximadamente unas 10.000 veces menor que en la superficie del Sol. Como resultado, la presión ejercida por la radiación en la superficie de la estrella puede dilatar la atmósfera de ésta, generando un viento de partículas muchas veces más intenso que el solar. A medida que el viento de una gigante roja se expande y se enfría, sus componentes se condensan para formar una envoltura de polvo, constituida, principalmente, por compuestos de silicio y carbono. Del envoltorio de polvo nos habla la emisión reforzada en el infrarrojo extremo, a longitudes de onda de entre 10 y 20 micrometros, donde la envoltura más fría, con su volumen mucho mayor, brilla más que la propia estrella roja. En una estrella simbiótica, no obstante, una fracción de la envoltura difusa puede ser ionizada por fotones de alta energía, procedentes de la caliente estrella compañera. Las líneas de emisión de los átomos excitados en la región visible del espectro constituyeron, pues, un aviso anticipado de la presencia de la estrella caliente. Para confirmar esta conclusión, y para establecer la naturaleza de la compañera, era necesario explorar otras regiones del espectro.

Los instrumentos a bordo de satélites equipados para explorar la región ultravioleta del espectro están capacitados para detectar longitudes de onda por debajo de 3300 ansgtrom, punto de corte en la transmisión de luz ultravioleta por la atmósfera terrestre. La información acerca de las estrellas simbióticas ha aumentado a extraordinaria velocidad desde la entrada en servicio del Explorador Internacional Ultravioleta, en la primavera de 1978. El satélite IUE es un proyecto conjunto de la Agencia Espacial Europea, el Consejo Británico de Investigación en Ciencia e Ingeniería y la NASA. Controlado desde estaciones de la NASA en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard, en Maryland, y en Villafranca del Castillo, cerca de Madrid, el satélite ha recogido unos 30.000 espectros ultravioleta de diversas muestras de objetos, entre ellas varias docenas de estrellas simbióticas.

El satélite porta un telescopio con una abertura de 45 centímetros que recoge luz hacia dos espectrógrafos. Cuatro cámaras Vidicon de televisión captan imágenes de espectros en el do-



5. ESPECTRO ULTRAVIOLETA del sistema simbiótico RX de la Nave, obtenido con el satélite Explorador Internacional Ultravioleta. El espectro cubre las longitudes de onda entre 1100 y 200 angstrom, dividido en una sucesión de segmentos espectrales, cada uno de unos 20 angstrom de anchura. En cada segmento, la longitud de onda aumenta del extremo inferior izquierdo al superior derecho. Los trazos brillantes son intensas líneas de emisión de átomos múltiplemente ionizados, identificados en la figura 6.



6. PRINCIPALES ATOMOS EXCITADOS en el espectro de RX de la Nave; a saber: de carbono, nitrógeno, oxígeno, helio y silicio. El número de electrones arrancados en cada caso es inferior, en una unidad, al número romano que se indica a la derecha del elemento. La línea Lyman-alfa del hidrógeno (*arriba y a la izquierda*), a 1215 angstrom, es una característica de emisión creada en la vecindad de la Tierra por la difusión de la luz Lyman-alfa emitida por el Sol. La línea aparece dos veces en el espectro debido a la manera como el espectrómetro del IUE dispersa la radiación ultravioleta, según su longitud de onda.

minio de longitudes de onda entre 1100 y 3200 angstrom. Los instrumentos operan en dos niveles de resolución. Seleccionado su blanco, el astrónomo puede solicitar espectros ultravioleta con una resolución de seis angstrom o bien de 0,1 angstrom.

Cuando se compara los espectros del satélite en la región ultravioleta con los espectros en superficie del visible, infrarrojo y de la región de radioondas, parece quedar pocas dudas de la naturaleza binaria de las estrellas simbióticas. Por ejemplo, el espectro continuo de la estrella simbiótica AG de Pegaso, en longitudes de onda del visible superiores a 4000 angstrom, corresponde a la emisión de una gigante roja fría cuya temperatura superficial es de 3300 grados Kelvin. Las observaciones del satélite IUE, examinadas por Mirec Plavec y Charles D. Keyes, de la Universidad de California en Los Angeles, sugieren que el espectro continuo, que asciende monótonamente con el decrecimiento de la longitud de onda para longitudes inferiores a 4000 angstrom, halla cabal explicación con la presencia de una estrella compañera a 30.000 grados. Las líneas de hidrógeno que dominan el espectro en la región visible proceden, evidentemente, de una nebulosa de gas excitado a 15.000 grados. A esa temperatura, una proporción substancial de los átomos de hidrógeno ionizado de la nebulosa se recombinan con los electrones y caen a estados de excitación más bajos, dando lugar al espectro de emisión del hidrógeno.

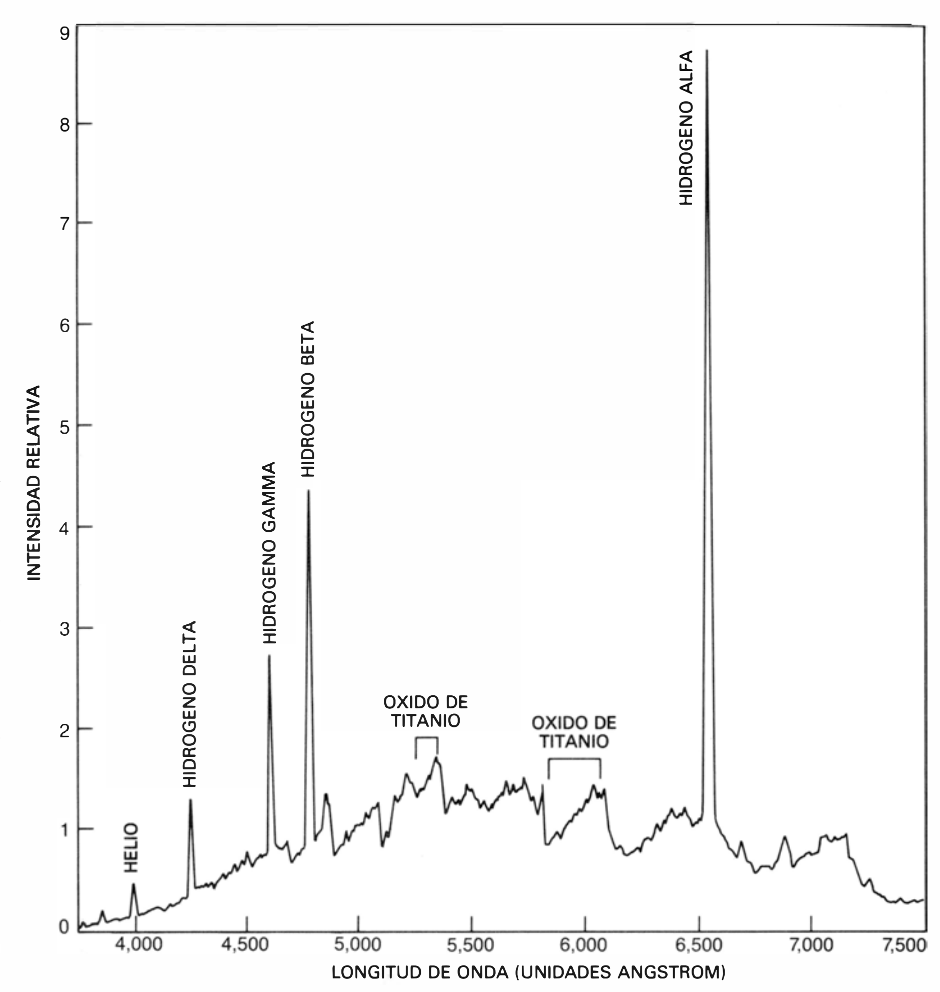
A longitudes de onda por debajo de 4000 angstrom, las emisiones ultravioleta observadas con el satélite IUE representan la radiación de átomos, múltiplemente ionizados, de helio, carbono, oxígeno, silicio y nitrógeno, exactamente lo que cabría esperar de un gas altamente excitado. El carbono triplemente ionizado produce líneas más intensas a longitudes de onda de 1548 y 1550 angstrom. En otras estrellas simbióticas, otras líneas rivalizan en intensidad con éstas: las de emisión del carbono doblemente ionizado, a 1907 y 1909 angstrom. Un sistema que presenta la emisión de helio simplemente ionizado, a 1640 angstrom, aloja, evidentemente, un gas nebular muy caliente, excitado seguramente por una estrella compañera caliente, con una temperatura superficial de 65.000 grados Kelvin, al menos.

La llave que nos abre la naturaleza de la estrella compañera es el espectro continuo en el ultravioleta. Las obser-

vaciones del satélite revelan espectros continuos de dos clases distintas. Algunas estrellas simbióticas tienen un espectro continuo que asciende monótonamente con la longitud de onda decreciente en el dominio entre 1200 y 2000 angstrom. Este comportamiento concuerda con la presencia de una estrella caliente y compacta a temperatura superior a 20.000 grados Kelvin. Buenos ejemplos de esta clase de espectro son los continuos de las estrellas simbióticas RW de Hidra, AG de Pegaso y Z de Andrómeda.

Otras estrellas simbióticas muestran un espectro continuo que es esencialmente plano por debajo de 2000 angstrom, pero aumenta con la longitud de onda entre 2000 y 3200 angstrom. Esa conducta aboga por la presencia de una estrella compañera moderadamente caliente, con una temperatura de unos 10.000 grados Kelvin, hipótesis esta que no carece de dificultades. Mark H. Slovak, de la Universidad de Minnesota, y el autor han calculado, cada uno por su cuenta, los espectros apropiados para una estrella de 10.000 grados. Han visto que la distribución de energía no se ajusta a los espectros realmente observados. Quizá provengan de procesos de ionización en la nebulosa no completamente conocidos o, por lo menos, más complicados que los postulados en los modelos. Ejemplos de sistemas simbióticos con tales espectros anómalos son CI de Cisne, RX de Popea y R de Acuario.

Merced al Explorador Ultravioleta Internacional sabemos también que la emisión ultravioleta de las estrellas simbióticas varía apreciablemente en cuestión de meses. Las medidas del IUE del espectro ultravioleta continuo de la estrella SY de la Mosca sugería la presencia de una estrella compañera del tipo enana caliente, con una temperatura de 50.000 grados Kelvin. Nueve meses antes el espectro indicaba, sin embargo, un objeto mucho más frío. No hay razón alguna para pensar que el aumento de brillo en el ultravioleta represente una fulguración, pues las líneas de emisión superpuestas al espectro continuo no cambiaron. Si se estuviera expulsando parte de la materia de una de las estrellas, el hecho aparecería en forma de un ensanchamiento de las líneas de emisión. Parece que se registró el espectro continuo de SY de la Mosca, único y deprimido, cuando el miembro caliente de la pareja estaba eclipsado por su luminosa compañera, mayor y más fría. La hipótesis se someterá a prueba en futuras observaciones.



7. ESPECTRO OPTICO de la estrella simbiótica Z de Andrómeda, obtenido por William P. Blair, de la Universidad de Michigan; muestra intensas emisiones del gas nebular excitado, ascendiendo por encima del espectro continuo, característico de una estrella gigante con temperatura de alrededor de 3000 grados Kelvin. La Z de Andrómeda se considera el prototipo de estrella simbiótica. Los máximos más intensos corresponden a las líneas de emisión del hidrógeno excitado conocidas por serie de Balmer. Indican que la nebulosa que rodea a la estrella gigante se está ionizando por una fuente próxima y caliente. La atmósfera de la gigante roja contiene también moléculas de óxido de titanio, que confieren al espectro la apariencia de dientes de sierra, al absorber parte del espectro continuo de radiación de la estrella.

Hay dos sistemas simbióticos de los que se sabe que son binarias eclipsantes: AR del Pavo Real y CI del Cisne. Basándose en los descensos regulares de la curva de luz que emiten, el primer sistema muestra un período orbital de 606 días y el segundo un período de 855 días. Si se supone que cada sistema tiene una masa total que dobla la solar, dedúcese que la distancia que separa ambas estrellas en cada sistema es del orden de cientos de millones de kilómetros, no muchos. Distancia que viene a asimilarse al radio de la gigante roja y a la región emisora de la nebulosa circundante. Lo que implica que las estrellas componentes de los sistemas simbióticos están casi en contacto. La gigante fría y su compañera caliente giran una alrededor de la obra de modo precario, rodeadas por una compacta nube de gas ionizado cuya emisión queda a veces empequeñecida por la radiación procedente de los gases calientes liberados cuando hay uno de los enormes intercambios de marea de masa entre ambas estrellas.

Las observaciones en el infrarrojo realizadas por David Allen, del Observatorio Angloaustraliano de Epping, Australia, han revelado una intensa emisión térmica que procede del polvo que envuelve a una docena de estrellas simbióticas. En los entornos de otras estrellas de éstas, empero, no hay polvo. La presencia de polvo afecta de un modo espectacular al brillo total del sistema y el carácter general del espectro continuo ultravioleta. Como las pequeñas partículas que absorben o difunden fotones tienen tamaños comparables a la longitud de onda de la radiación ultravioleta, producen su máximo efecto en esa región del espectro.

En el espacio interestelar, las partículas de polvo no sólo absorben o difunden los fotones ultravioleta, sino

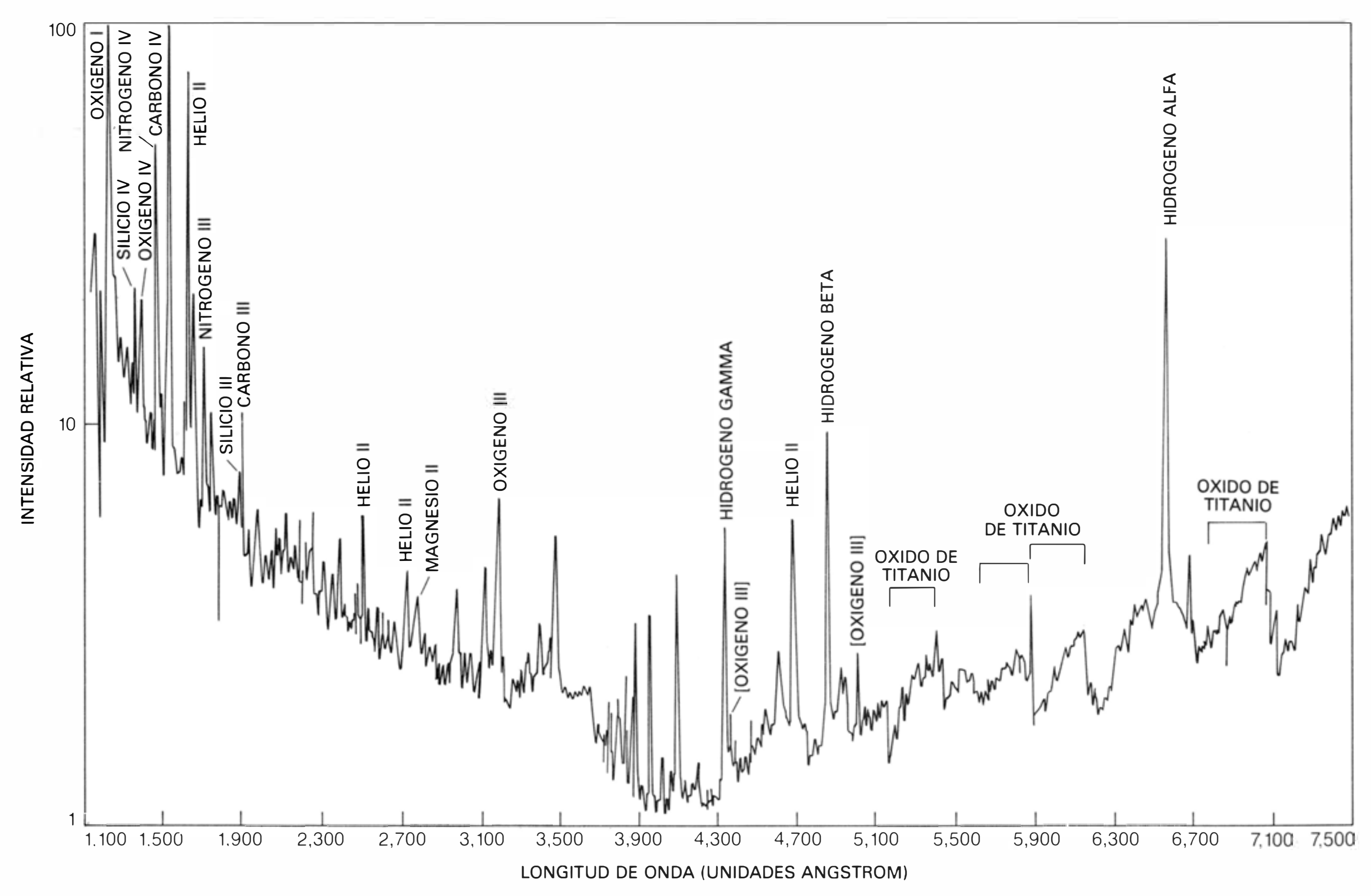
también los fotones de las longitudes de onda visibles, oscureciendo totalmente los objetos que se encuentran en el plano central de la galaxia o en su vecindad, a distancias superiores a algunos millares de años-luz. Los astrónomos denominan enrojecimiento a dicha atenuación. Para las observaciones en el ultravioleta, un marcado mínimo a 2200 angstrom indica la presencia de partículas de grafito en el polvo. De hecho, los astrónomos aprovechan frecuentemente la cuantía de la absorción a 2200 angstrom para estimar el polvo en la dirección de las estrellas emisoras en el ultravioleta.

Paradójicamente, unas cuantas estrellas simbióticas que muestran un intenso enrojecimiento debido al polvo en las longitudes de onda visibles y una intensa emisión procedente del polvo a las longitudes de onda en el infrarrojo comprendidas entre 10 y 20 micrometros no presentan traza alguna de la extinción por partículas de grafito a 2200 angstrom. La ausencia de tal absorción en los sistemas simbióticos sugiere que la extinción en el plano galáctico no representaría partículas de polvo, ampliamente repartidas a lo largo de la visual, sino concentraciones de polvo, mucho más localizadas, asociadas con los objetos o regiones particulares sometidas a observación.

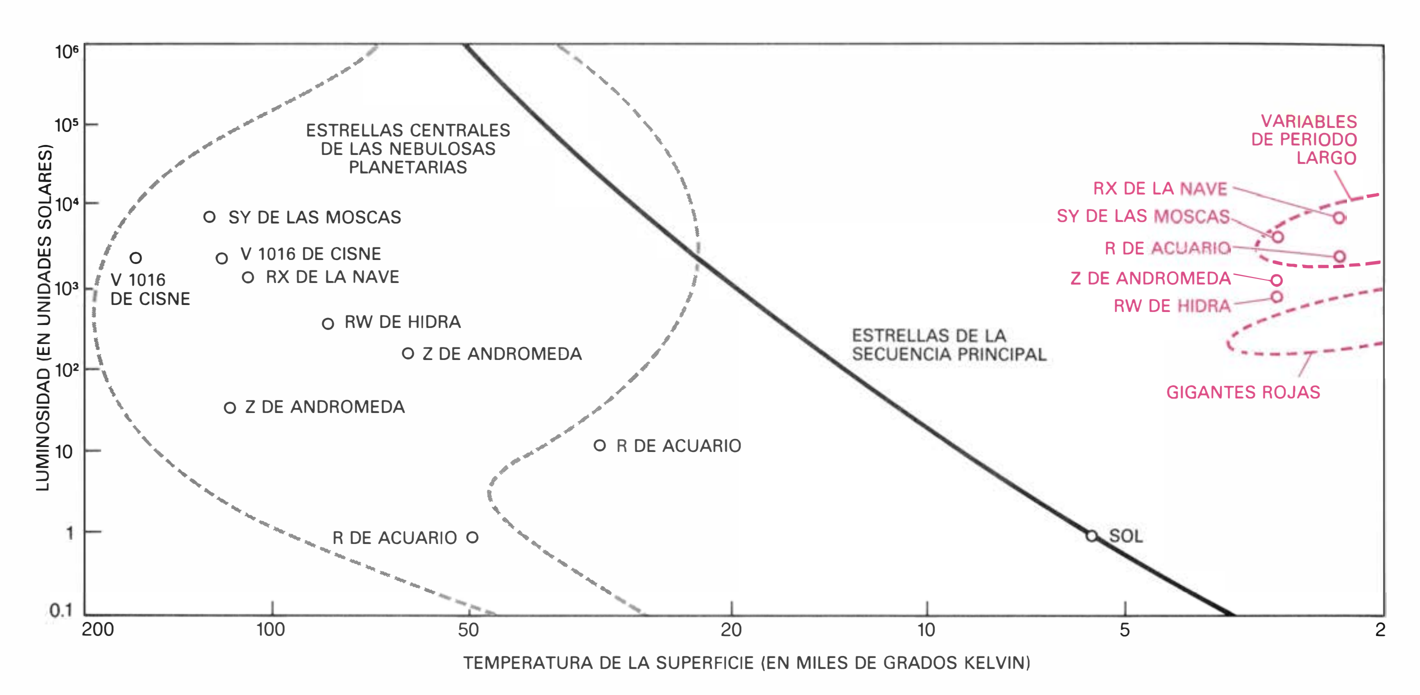
Como mínimo, la ausencia de absorción a 2200 angström en la dirección de estrellas simbióticas, que por lo demás presentan claras indicaciones de polvo, significa que las propiedades físicas de las partículas de polvo en los sistemas simbióticos difieren, por completo, de las propiedades de las partículas que se cree constituyen el polvo del medio interestelar. Asimismo, ello nos hace sospechar que el viento estelar procedente de las estrellas gigantes rojas ordinarias no es, como se suponía, la fuente principal del polvo interestelar. Si lo fuese, para dar cuenta de la absorción a 2200 angstrom, las partículas expulsadas por la gigante roja deberían cambiar su tamaño después de penetrar en el espacio interestelar.

La composición química del material nebular en los sistemas simbióticos se nos ofrece como un verdadero rompecabezas. Los análisis de las líneas de emisión ultravioleta procedentes de las regiones más calientes de la nebulosa señalan que ciertos elementos pesados, especialmente el silicio y el carbono, abundan menos que en el conjunto del universo. Es posible que la relativa escasez de tales elementos refleje simplemente ciertas peculiaridades de los procesos de combustión nuclear de los sistemas simbióticos.

Dicha escasez se nos atestigua con nitidez en los espectros que el Explorador Ultravioleta Internacional ha obtenido de dos de las estrellas simbióticas de la Gran Nube de Magallanes. Una de ellas, identificada como LMC Anónima, a falta de mejor designación, muestra intensas líneas de emisión de nitrógeno y helio en el ultravioleta lejano, pero nada indica la presencia de



8. ESPECTROS ULTRAVIOLETA Y VISIBLE de AG de Pegaso; combinan un espectro visible registrado desde el suelo con un espectro ultravioleta registrado por el IUE. Debemos su preparación a Mirek Plavec y Charles D. Keyes, de la Universidad de California en Los Angeles. El espectro continuo que crece al aumentar la longitud de onda hacia la derecha sugiere la presencia de una estrella gigante roja fría, con una temperatura en superficie de 3300 grados Kelvin. Los mínimos del espectro continuo se atribuyen al óxido de titanio; las líneas de Balmer del hidrógeno indican que la estrella gigante se halla inmersa en una nebulosa excitada. El espectro ultravioleta continuo, creciendo fuertemente al disminuir la longitud de onda hacia la izquierda, revela la presencia de una estrella compañera caliente, a 30.000 grados. Las líneas del oxígeno doblemente ionizado [O III] son transiciones de energía "prohibidas"; se pueden producir sólo en un gas tan tenue que los choques entre los átomos sean demasiado infrecuentes para que las especies excitadas caigan nuevamente a sus niveles de energía más bajos. El oxígeno no ionizado, [O I], se encuentra normalmente en la atmósfera de estrellas muy frías.



9. AL REPRESENTAR LA LUMINOSIDAD en función de la temperatura se ve dónde aparecen las estrellas componentes de los sistemas simbióticos en el clásico diagrama de Hertzsprung-Russell. La gran mayoría de estrellas, todavía ampliamente provistas de combustible nuclear, ocupan la banda llamada secuencia principal (*línea gruesa que atraviesa la ilustración*); en ésta, la luminosidad aumenta con el tamaño y la temperatura superficial. Las gigantes rojas de los sistemas simbióticos caen a la derecha, cerca de la región poblada por las típicas gigantes rojas (*color*), estrellas que han adquirido mayor luminosidad, y se han tornado más frías, a medida que su combustible nuclear se iba agotando. Los miembros calientes de los sistemas simbióticos se agrupan a la izquierda de la secuencia principal, en una región poblada por las calientes estrellas centrales de las nebulosas planetarias. A causa de incertidumbres en la medida del espectro ultravioleta, algunos miembros calientes de los sistemas simbióticos se representan en dos posiciones distintas.

carbono. De acuerdo con la teoría de la síntesis de los elementos por combustión nuclear, el nitrógeno y el helio abundan con respecto al carbono, en el núcleo de las gigantes rojas, en la fase de combustión nuclear conocida por ciclo CNO (de carbono, nitrógeno y oxígeno). El exceso de nitrógeno con respecto al carbono en LMC Anónima podría explicarse mediante un dragado del material rico en nitrógeno del núcleo de la gigante roja hacia la parte externa. Por tanto, las intensas líneas de emisión del nitrógeno revelan que el ciclo CNO está operando en la gigante roja del sistema simbiótico.

El déficit de carbono observado en los espectros de las estrellas simbióticas podría intensificarse con la precipitación de carbono atómico, junto con silicio, en compuestos químicos que acaban formando parte de las partículas de polvo y, por tanto, dejan de estar disponibles para la excitación y emisión. Según otra hipótesis, sugerida por Allen, la componente fría y luminosa de los sistemas simbióticos ricos en polvo no sería una gigante roja típica, sino una estrella variable de largo período, de la clase Mira (la estrella prototipo es Mira del Delfín). Las variables Mira pulsan, de manera característica, con un período de varios cientos de días y experimentan un cambio de magnitud de cinco o más unidades (una variación de luminosidad en un factor de 100 o más veces). Se sabe que las variables Mira están rodeadas de granos de polvo de silicatos, a temperaturas entre 800 y 1000 grados Kelvin. Tal vez sea significativo que las estrellas simbióticas que presentan un alto nivel de enrojecimiento por el polvo carezcan también de espectro continuo ultravioleta creciente al disminuir la longitud de onda. Por cuya razón sostenemos la probabilidad de que el polvo enmascare el esperado crecimiento del espectro continuo ultravioleta de la compañera caliente.

Las líneas de emisión ultravioleta permiten deducir importantes características de la región ionizada en los sistemas simbióticos. Un gran experto en tal análisis es Harry Nussbaumer, del Instituto Federal Suizo de Tecnología. La intensidad de las líneas de emisión es proporcional al cuadrado de la densidad electrónica y al volumen de la región emisora, de modo que puede estimarse, con facilidad, el tamaño de la nebulosa ionizada. Nussbaumer ha visto que, invariablemente, esta región es sólo algo mayor que el diámetro de la gigante roja. Ciertas líneas de emisión del oxígeno doblemente ionizado y del helio simplemente ionizado son, también, una medida de la cantidad total de radiación ionizante que se necesita para calentar la nebulosa gaseosa del sistema. Si se supone que toda la radiación ionizante procede de la estrella compañera caliente, podremos calcular la temperatura y la luminosidad de ésta y compararlas con las de otras estrellas familiares. Lo que se lleva a cabo en el clásico diagrama de Hertzsprung-Russell, donde se representa la temperatura en función de la luminosidad.

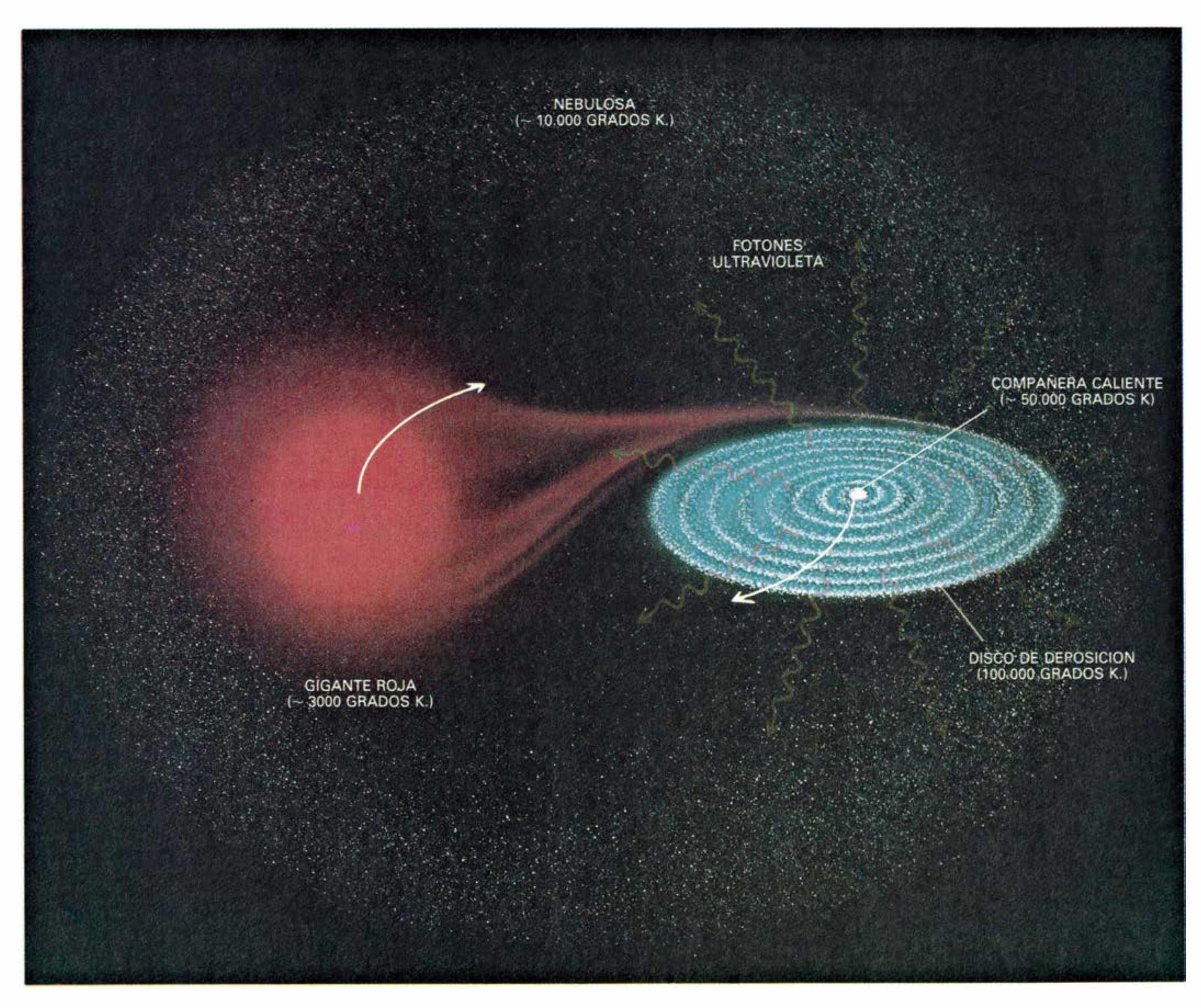
En tal diagrama se ve que las estrellas secundarias calientes están, para una luminosidad dada, unas diez veces más calientes que las estrellas típicas de la galaxia, las cuales ocupan la banda llamada secuencia principal. Puede no ser una coincidencia el que las estrellas centrales de las nebulosas planetarias caigan en la misma zona del diagrama que los miembros calientes de los sistemas simbióticos. Los miembros fríos de los sistemas simbióticos ocupan, generalmente, la zona del diagrama donde se encuentra también las estrellas variables de largo período. Tales estrellas tienen temperaturas en superficie que son sólo una décima parte de las que corresponden a las estrellas de la secuencia principal con igual luminosidad. Su luminosidad es de 1000 a 10.000 veces mayor que la del Sol.

Las intensas líneas de emisión ultravioleta pueden revelar también la densidad de materia en la nebulosa simbió-

tica. La densidad típica resulta elevada, unas 10^9 partículas por centímetro cúbico, frente a las 10^4 partículas, en igual volumen de gas, de las nebulosas planetarias. Esto ha llevado a algunos astrónomos a sugerir que los sistemas simbióticos pueden representar una fase primitiva de la evolución de una nebulosa planetaria. Quienes rechazan esa idea razonan que la mayor parte de los sistemas simbióticos son binarios, casi con toda certeza, mientras que la mayoría de las nebulosas planetarias parecen albergar una sola estrella.

Hasta ahora, nos hemos limitado a la emisión ultravioleta de las estrellas simbióticas. ¿Emiten también radiación de longitud de onda más corta, rayos X? El Observatorio Astronómico de Alta Energía 2, conocido también por Observatorio Einstein, estuvo en funcionamiento de 1978 a 1981. Durante ese tiempo observó una docena de estrellas simbióticas, en una búsqueda de la emisión de rayos X, entre 4 y 12 angstrom. Pasando revista a los resultados, Allen no encontró emisión de rayos X importante que viniera de estrellas simbióticas típicas. En tres casos, sin embargo, se registraron rayos X de sistemas que presentaban peculiaridades en otras longitudes de onda: HM de la Flecha, V 1016 del Cisne y RR del Telescopio.

Según se cree, se origina emisión de rayos X cuando los gases calientes en movimiento turbillonario escapan de una estrella gigante y forman un disco al caer sobre la estrella compañera compacta. Se producen esos discos de deposición porque la corriente gaseosa abandona la superficie de la estrella gigante con un elevado momento cinético, resultado de la alta velocidad orbital de las estrellas del sistema binario. En un tal intercambio de naturaleza análoga a las mareas, la materia expulsada no puede dirigirse en línea recta a la superficie de la estrella compacta, sino que debe rodearla, describiendo una espiral cada vez más cerrada. Si hay materia suficiente, el disco de deposición queda formado. Aunque tales discos existen probablemente en la mayoría de los sistemas simbióticos, resulta verosímil que sean mayores y desprendan menos calor que los más cerrados, que generan rayos X. En virtud de lo cual, los discos simbióticos dan lugar



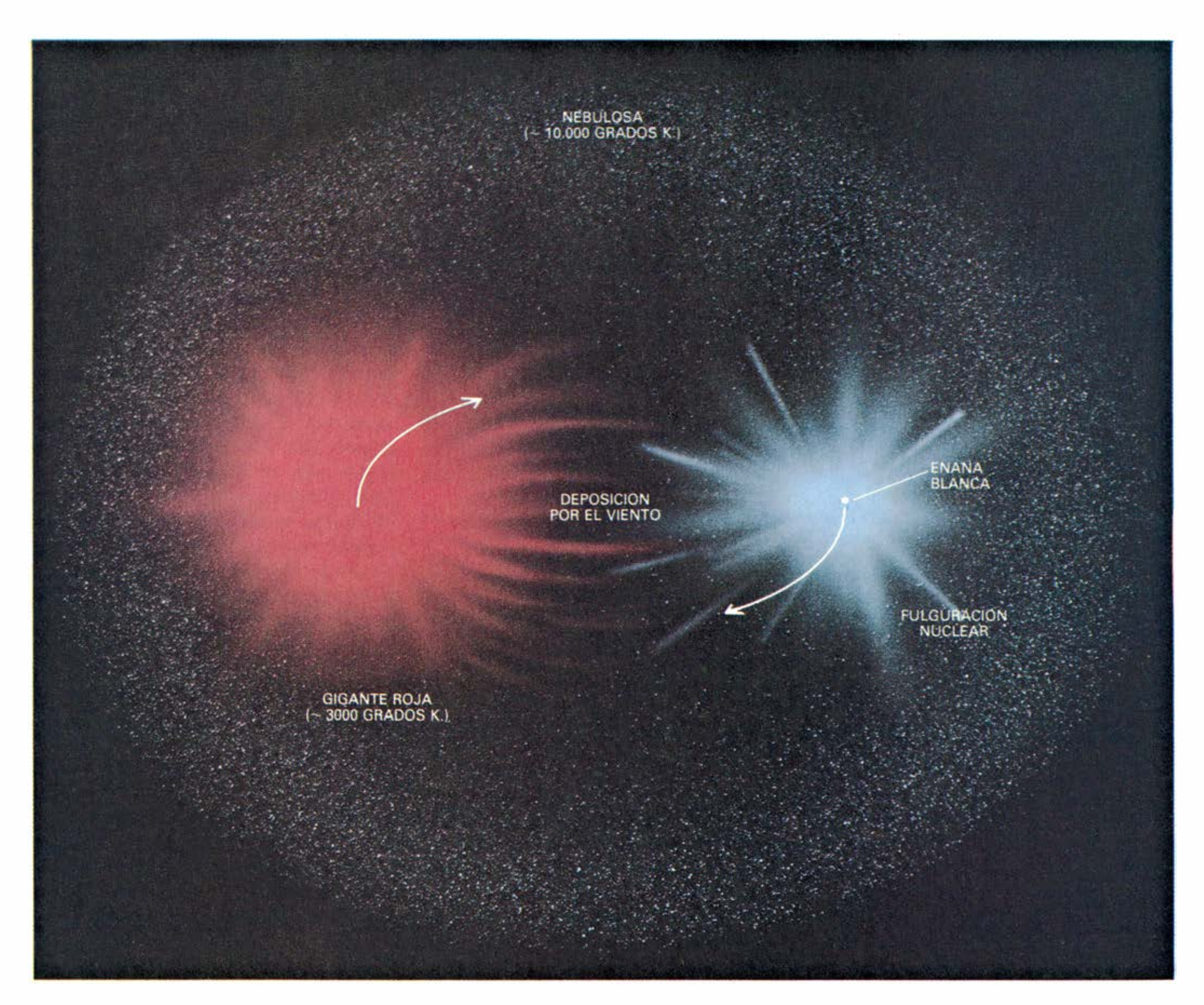
10. FULGURACIONES EN LOS SISTEMAS SIMBIOTICOS. Se han explicado mediante dos modelos, que se ilustran en esta figura y en la 11. El modelo de fulguración de disco de deposición, aquí, sugiere que la emisión ultravioleta y visible reforzada de algunos sistemas simbióticos procede de un disco que se forma alrededor del miembro caliente del par, siguiendo una corriente de marea de materia desde la estrella compañera gigante roja. A causa del movimiento orbital de alta velocidad de las dos estrellas, la materia expelida de la tenue envoltura de la gigante roja no se deposita directamente sobre la superficie de la pequeña estrella caliente, sino que forma un disco al describir espirales hacia dentro. Las colisiones entre las partículas que se entrecruzan calientan el disco de deposición hasta unos 100.000 grados Kelvin; el propio disco se convierte entonces en una intensa fuente de radiación ultravioleta.

a fotones ultravioleta, en vez de fotones de rayos X.

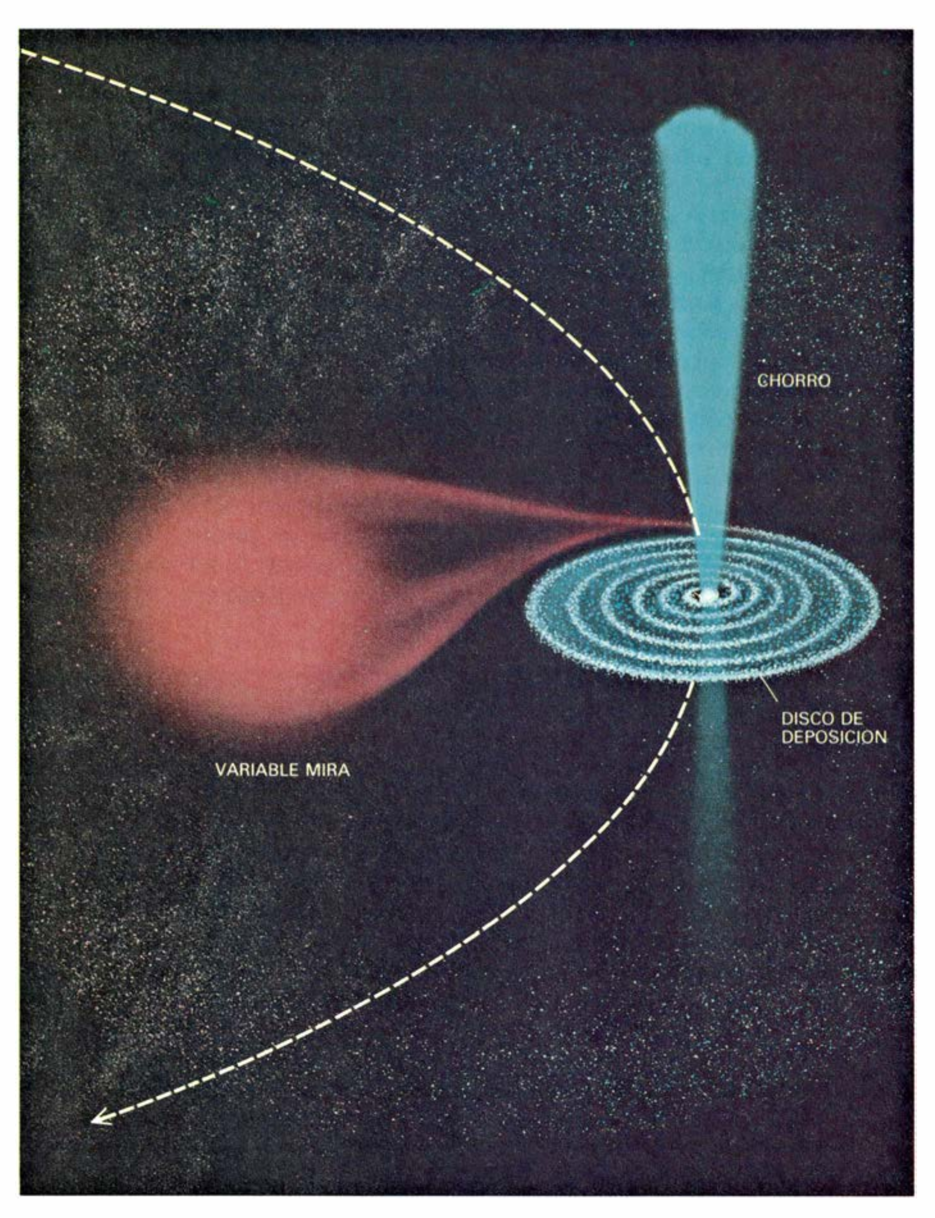
Un sistema simbiótico que muestra, en el ultravioleta, una indicación directa del intercambio de marea de materia entre las estrellas componentes es RX de la Nave. El sistema fue estudiado por el astrónomo belga Pol F. Swings y su hijo, Jean Pierre Swings. Sugirieron que la RX de la Nave alojaba una estrella algo parecida a una "nova lenta", tipo de nova cuyo decrecimiento en emisión de luz después de una fulguración es lento, comparado con el de las novas corrientes. Las observaciones infrarrojas de RX de la Nave muestran la presencia de polvo, e incluso de vapor de agua, propiedades características de una variable Mira fría.

Tras un período tranquilo, que duró unos cuarenta años, RX de la Nave está retornando a un estado de alta excitación. Los espectros de alta resolución obtenidos por los autores mediante el Explorador Ultravioleta Internacional, a lo largo de un período de dos años, revelan importantes cambios de estructura que no se ven en los espectros de ningún otro sistema simbiótico. Los trazos de emisión múltiple en los espectros están corridos hacia el rojo, prueba de la existencia de corrientes entre las estrellas componentes del sistema. Espectros comparables de otros sistemas simbióticos muestran estrechas líneas de emisión, lo que indica que las líneas surgen de nebulosas compactas y en reposo.

Resultará difícil observar directamente los discos de deposición en los sistemas simbióticos, pues la densidad del gas en tal disco es, probablemente, demasiado grande para la formación de líneas de emisión. Además, la radiación de la gigante fría luminosa ocultará el espectro continuo de radiación del disco a longitudes de onda visibles. No obstante, Geoffrey T. Bath, de la Universidad de Oxford, y James E. Pringle, de la Universidad de Cambridge, creen que las enérgicas fulguraciones observadas en algunos sistemas simbióticos constituyen señales importantes de la formación de grandes discos de deposición cuando grandes volúmenes de materia escapan de la gigante roja y son atraídos hacia la compañera caliente. En su modelo, una estrella compacta caliente, o tal vez una estrella, algo mayor y más fría, de la secuen-



11. MODELO TERMONUCLEAR de las fulguraciones. Requiere la cesión de materia desde la gigante roja a su compañera menor y más caliente; ahora bien, la posible formación de un disco de deposición no es decisiva para apoyar la tesis. En este modelo, la estrella caliente es una enana blanca, estrella que ha agotado su provisión de combustible nuclear y se ha contraído hasta el tamaño aproximado de la Tierra. Tal estrella brillará miles de millones de años más, mientras se enfría. El material expulsado por la gigante roja se acumula sobre la superficie de la enana blanca, formando una envoltura caliente e ionizada que dificulta el flujo de radiación desde la superficie de la estrella. La temperatura de la envoltura sobrecalentada de la enana blanca alcanzará los 100 millones de grados K., en cuyo momento se reavivan las reacciones termonucleares y se produce una brusca emisión de radiación.



12. EL CHORRO DE R DEL ACUARIO parece producirse cuando la estrella secundaria y caliente del sistema, en su órbita elíptica de 44 años, alcanza su máxima proximidad a su compañera fría. En ese momento, la materia despedida por la gigante forma un disco de deposición alrededor de la estrella menor. Las colisiones entre las partículas en movimiento turbulento calientan el disco a una alta temperatura que corresponde a una alta luminosidad. Por un mecanismo que desconocemos, la materia es expulsada, alejándose del sistema a lo largo de un eje perpendicular al disco y al plano orbital del sistema. A medida que este chorro colimado abandona el sistema, se enfría y crea las burbujas de gas observadas.

cia principal, ejerce una intensa atracción gravitatoria sobre los gases calientes producidos en el sistema. A medida que el volumen de materia depositada alrededor de la estrella compacta aumenta, la atracción gravitatoria de la estrella compacta se va reduciendo gradualmente por la creciente masa de la materia a su alrededor y, finalmente, se hace más débil que la presión de radiación que actúa sobre las partículas del disco de deposición. En este punto, la presión de radiación desencadena la salida de una corriente de gran masa de gas depositado, en forma de un potente viento estelar. Indicaciones espectroscópicas apoyan esta hipótesis.

Se ha calculado que el viento así desencadenado debe tener una velocidad mucho mayor que el viento que normalmente sopla desde las gigantes rojas individuales. Basándose en este modelo, Sun Kwok, de la Universidad de Calgary, George Wallerstein, de la de Washington, y Lee Anne Willson, de la Universidad del estado de Iowa, han sugerido que el viento de baja velocidad de la gigante roja puede colisionar con el viento de mayor velocidad procedente del disco de deposición que rodea la estrella compacta, dando lugar a una capa de materia altamente ionizada entre ambas estrellas. De una manera u otra, si esos discos existen en las estrellas simbióticas, podrían justificar el alto estado de excitación que se ha observado en las nebulosas de tales sistemas.

Hasta ahora, no se ha podido determinar la naturaleza exacta de la estrella compacta, a cuyo alrededor se forma, probablemente, el disco. Puede muy bien ocurrir que éste se desarrolle en sistemas simbióticos donde el miembro menor es una estrella relativamente fría, parecida al Sol, y no compacta y caliente. En colaboración con Robert E. Stencel, de la NASA, y Boyarchuk, los autores han hallado indicaciones de la existencia de una estrella de tipo solar en CI del Cisne, binaria eclipsante cuyo período orbital es de 855 días. Como se ha visto más arriba, el espectro ultravioleta del CI del Cisne es poco corriente, en el sentido de que la intensidad no crece al disminuir la longitud de onda; revela eso que la temperatura de su miembro secundario no alcanza los 10.000 grados Kelvin. La nueva prueba sugiere que la secundaria puede ser una estrella de temperatura baja, de unos 6000 grados Kelvin.

La naturaleza y temperatura de la secundaria compacta determinan las características de las fulguraciones que tengan lugar. Según ello, las observaciones de fulguraciones en estrellas simbióticas deberían proporcionarnos datos significativos del sistema en su conjunto. Se desconoce cuál sea la causa de tales fulguraciones. Se ha propuesto dos hipótesis del todo diferentes. En el modelo diseñado por Bath, la materia que fluye de la gigante fría forma un disco de deposición cuya temperatura alcanza los 100.000 grados Kelvin cerca de la superficie de la compañera compacta, en virtud de la turbulencia y el rozamiento en el gas arremolinado. Esto somete al gas circundante a una intensa presión de radiación que empuja grandes volúmenes de materia, alejándolos del sistema en forma de viento estelar.

En el modelo de Bath, la principal fuente de radiación de alta temperatura es el disco de deposición; importa poco si la secundaria compacta es una subenana caliente, la estrella central de una nebulosa planetaria o una estrella más fría, de la secuencia principal. Recientemente, Scott J. Kenyon, del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, ha calculado las distribuciones de energía para discos de deposición en estrellas simbióticas. Su trabajo favorece la existencia de un disco de deposición en algunos siste-

mas simbióticos. La intensidad del viento centrífugo sería modulada por las variaciones de la velocidad con que la masa pasa de la estrella mayor a la menor. Tales variaciones podrían reflejar cataclismos periódicos en la envoltura más externa de la gigante roja o cambios en la distancia orbital entre los dos miembros del sistema.

De acuerdo con un segundo modelo, propuesto por Bohdan Paczynski y Bronislaw Rudak, del Centro Astronómico Copérnico de Varsovia, las fulguraciones periódicas en los sistemas simbióticos resultarían del inicio brusco de la combustión nuclear en la superficie de una enana blanca. En una estrella tan densa y caliente, en la que queda poco hidrógeno, la hoguera nuclear se redujo hace tiempo a brasas. Mas, a medida que la materia expulsada por la compañera gigante roja se deposita sobre la superficie de la enana blanca, la presión cerca de la superficie aumenta continuamente, hasta provocar la ignición del hidrógeno restante. Las variaciones en la velocidad de cesión de masa modulan la intensidad de la reacción nuclear, explicando así las fulguraciones observadas. Entra dentro de lo verosímil que cada modelo explique una porción de sistemas simbióticos. Sólo el de Bath da cuenta de las fulguraciones observadas en CI del Cisne, donde falta la enana blanca.

Las estrellas simbióticas presentan otros fenómenos intrigantes. Por su carácter curioso destaca el asociado con la estrella R del Acuario, el sistema simbiótico más brillante en la región visible del espectro que se conoce. De R del Acuario brota un largo chorro de materia, de apariencia semejante al chorro de alta velocidad que se extiende desde el núcleo de una galaxia activa. Sin embargo, a diferencia de tal chorro, cuya velocidad se aproxima a la de la luz, el chorro de R del Acuario fluye a unos cientos de kilómetros por segundo, es decir, a una milésima parte de la velocidad de la luz.

Pese a ello, la expulsión de materia desde R del Acuario, altamente direccional, resulta fascinante e inesperada a un tiempo. La descubrieron Wallenstein y Jesse L. Greenstein, del Instituto de Tecnología de California; de su estudio se ocupó más tarde George H. Herbig, de la Universidad de California en Santa Cruz. El chorro de R del Acuario podría remedar las burbujas de baja velocidad que se han observado en nubes de gas donde parece estar formándose nuevas estrellas. También se han registrado burbujas expulsadas cerca de la nebulosa planetaria conocida como Abell 30.

Recientemente, los autores y otros investigadores han observado el chorro de R del Acuario a radiofrecuencias, con el radiotelescopio de gran distribución situado en Socorro, Nuevo México. Y han llegado a la conclusión de que el chorro se forma cuando las dos estrellas del sistema pasan muy cerca una de otra, cada 44 años, en una órbita altamente elíptica. En tales épocas, la envoltura de la estrella gigante, probablemente una variable Mira, se pone casi en contacto con su compañera mucho más caliente, provocando una rápida cesión de masa.

Este modelo se ve apoyado por los datos más recientes que se han obtenido con el radiotelescopio de gran distribución, en colaboración con Jan M. Hollis, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard. En las longitudes de radioondas entre 2 y 20 centímetros, la distribución de energía del chorro permanece constante con la longitud de onda, lo que resulta distinto de la pendiente que muestra la región central ionizada que envuelve el sistema binario. El descubrimiento sugiere que el chorro es propulsado por procesos térmicos del tipo observado en gases calentados por ondas de choque. Tal calentamiento por ondas de choque sería posible si la materia expulsada hubiera de surcar la tenue nebulosa circundante, elevando así, bruscamente, su temperatura por encima de la del material en reposo.

La radioemisión de la nebulosa ionizada central se genera térmicamente por la radiación ultravioleta de la estrella compañera caliente y su disco de deposición. Cuando las dos estrellas están a su mínima distancia, la velocidad de deposición es tal que la presión de radiación empuja la materia sobrante fuera del sistema, a lo largo de un eje perpendicular al plano de la órbita del disco de deposición. Cualquiera que sea la razón última, no deja de llamar la atención que un sistema simbiótico cree un chorro colimado de materia de alta velocidad.

De acuerdo con nuestro modelo, el chorro actualmente observado se formó durante un paso próximo, hacia la mitad del decenio pasado. Y si eso ocurrió, hubo de producirse otro chorro similar 44 años antes (en los años treinta). La aparición de los chorros en cada paso próximo puede estar relacionada con las fuertes variaciones de emisión de luz que se han observado en R del Acuario. Hacia mediados de los años treinta, R del Acuario fulguró de manera tal que Merrill la comparó con el comportamiento de una nova lenta. El sistema completo está encerrado en una nebulosa lentiforme. Merrill y otros científicos sugirieron que la nebulosa era el resto de una gran fulguración que pudo desarrollarse hace unos seiscientos años. Mas hoy se supone que la fulguración fue una "estrella invitada", descrita por los astrónomos japoneses en el año 930 de nuestra era, cientos de años antes. En nuestro lenguaje la llamaríamos nova.

El curso exacto de la evolución que convierte un sistema binario en uno simbiótico es materia de especulación. El número comparativametne pequeño de simbióticas conocidas en nuestra galaxia sugiere que, si todas las binarias de masa modesta pasan normalmente por una fase simbiótica en su evolución, tal fase debe ser de cortísima duración, no más allá del millón de años. Se sospecha que el curso de la evolución de un sistema binario está predeterminado por la masa y momento cinético iniciales de la nube gaseosa dentro de la cual nacen los sistemas binarios. Puesto que las gigantes rojas y las variables Mira son estrellas de masa igual a una o dos masa solares, parece plausible que la nube original, de la que procede el sistema simbiótico, comprenda sólo unas pocas masas solares de gas.

La distancia que separa las estrellas en la fase en que la nube de gas se condensa puede ser el factor crítico que determina los pasos finales de la evolución binaria. Así, las simbióticas constituirían una familia, distinta de los sistemas binarios que presentan intensa emisión de rayos X. Las binarias de rayos X tienen períodos orbitales extremadamente cortos, que se cuentan desde días hasta horas. El período orbital típico de las simbióticas es de centenares de días, lo que refleja una separación mucho mayor entre las dos componentes.

Se debe ser prudente, sin embargo, al tratar de inferir las propiedades iniciales de las nubes gaseosas que pueden dar origen a distintas clases de sistemas binarios, por la sencilla razón de que se desconoce el ritmo de pérdida de momento cinético y de masa en tales sistemas. Otros factores complican la cuestión: los campos magnéticos estelares, creados por la acción de dinamo de la rotación estelar, y la manera como tales campos afectan el curso de la evolución del sistema; factores que no se han explorado todavía, ni siquiera de manera preliminar.

Tratamiento de textos plurilingües

Las ventajas de la mecanografía y corrección computarizada de textos están en trance de generalizarse a todas las lenguas vivas. Es factible procesar incluso grafías tan complejas como la japonesa y la arábiga

Joseph D. Becker

Los ordenadores personales son en la actualidad inquilinos frecuentes de oficinas y hogares. Aunque útiles por muchos conceptos, seguramente, y a pesar de otras aplicaciones más novedosas, resultan de especial valor para un mayor número de personas cuando desempeñan funciones de máquina de escribir. En tal papel permiten al usuario la lectura de textos sobre una pantalla, así como el repaso y corrección de lo escrito antes de imprimirlo en papel. Los programas de ordenador que posibilitan tales capacidades se conocen por *software*, soporte lógico, o logicales, de tratamiento de textos.

Hasta la fecha, el tratamiento de textos por ordenador estaba en gran medida confinado a textos escritos en inglés. Lo cual no es sorprendente, pues la mayoría de ordenadores han sido ideados y manufacturados en países de habla inglesa; tampoco debe olvidarse que el inglés es hoy el idioma principal del comercio internacional. No existen, empero, razones de carácter técnico para que el procesamiento de textos quede limitado a este idioma. En efecto, no sólo es posible para los programas la manipulación de textos en francés, alemán, español, ruso y demás lenguas europeas o eslavas, sino también la de grafías más complejas, como la arábiga, china, hebrea, japonesa o coreana. Mis colegas y yo, en la Xerox Corporation, hemos preparado programas de tratamiento de textos plurilingües destinados a un ordenador personal, llamado Star, que manufactura Xerox. La idea fundamental que nos guía es que el ordenador ha de manejar una noción de "texto" suficientemente general para dar cabida a cualesquiera lenguas vivas del mundo, en cualquier combinación.

A tal efecto, por consiguiente, será preciso hacer coexistir en el ordenador la fascinante diversidad de símbolos escritos que ha creado la humanidad. Inicialmente, a duras penas parece que tal sea posible. La escritura arábiga, por ejemplo, fluye en arcos y volutas, de derecha a izquierda. La grafía thai y otras escrituras originarias de la India antigua tienen letras que pueden desplazarse en torno a sus vecinas, saltándose por tanto el orden fonético. En ocasiones una letra llega a rodear a sus vecinas. El coreano agrupa sus letras en apiñamientos silábicos. (El alfabeto coreano fue inventado, partiendo de la nada, por un grupo de estudiosos, en 1443.) El chino, que es el más antiguo de todos los sistemas de escritura que perviven, consta de decenas de miles de caracteres ideográficos. Cada carácter es una composición caligráfica en miniatura, encerrada en su propio marco cuadrado. Se diría que los inventores del ordenador digital se han dejado seducir por el alfabeto latino, tal vez el de más sencilla escritura de todos, por constar de letras, sin ornamento, dispuestas consecutivamente.

¿Cómo lograr que logicales inicialmente ideados para manipular únicamente textos en inglés amplíen su campo de aplicación, hasta abarcar la total diversidad de sistemas de escritura del mundo? Las muchas dificultades y escollos que plantea semejante tarea pueden agruparse en tres dominios fundamentales. Tiene que haber un procedimiento de representación de textos en la memoria del ordenador; tiene que poder dactilografiarse los textos en el teclado del ordenador; el ordenador debe mostrar los textos al usuario. Denominaré a esos tres grandes campos codificación, dactilografía y presentación; entendiendo por presentación tanto la proyección del texto sobre la pantalla del ordenador como la impresión del texto en papel.

La codificación está gobernada por un único hecho fundamental, a saber, que el ordenador sólo puede almacenar números. Más aún, los únicos números que puede almacenar son los binarios, formados por secuencias de ceros y unos. Por consiguiente, la representación de textos en la memoria del ordenador se hace almacenando para cada letra un número codificado en sistema binario. En el caso del alfabeto latino, el código ASCII (American Standard Code for Information Interchange, código normalizado americano para intercambios de información), de uso generalizado, le asigna a la letra *A* el número binario 01000001, a la letra *B*, el 01000010; el 01000011 a la *C*, y así sucesivamente. Por tanto, al pulsar en el teclado de un ordenador una *A*, lo que en realidad se le dice a la máquina es que almacene el número de código 01000001. Cuando el ordenador debe mostrar o imprimir una letra codificada como 01000001, sus instrucciones le hacen dibujar un símbolo que nosotros reconocemos como una *A*. En tanto las instrucciones de ingreso y egreso de señales de la máquina sea coherente, tendremos la ilusión de que se ha almacenado en el ordenador la letra *A*.

Por lo común, los ordenadores almacenan información en unidades llamadas octetos o *bytes*; los octetos son grupos de ocho dígitos binarios, también llamados *bits*. Parece, por tanto, razonable almacenar textos a razón de un octeto por carácter. La dificultad reside

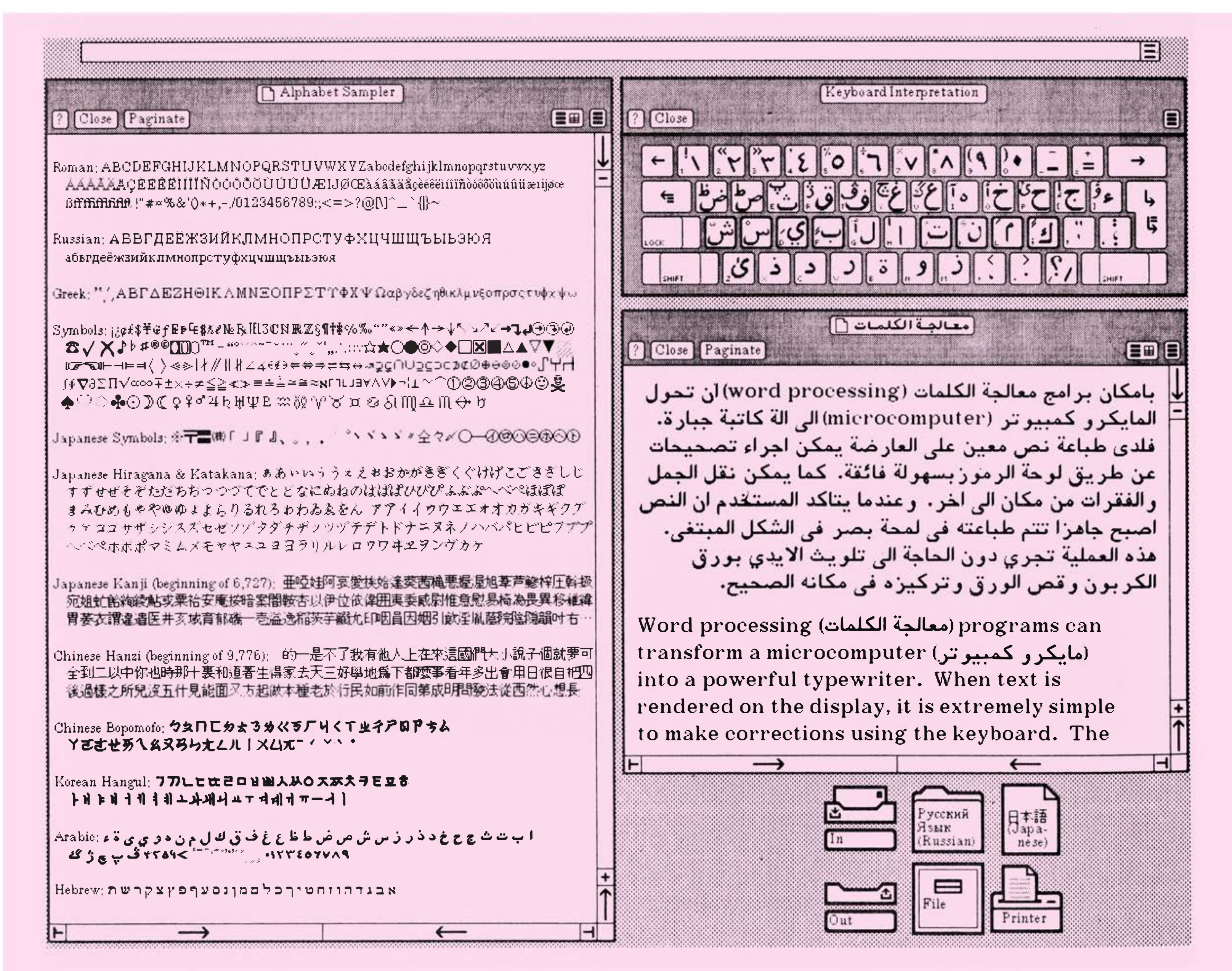
1. UN TEXTO PLURILINGUE ocupa buena parte de este "volcado", que presenta el contenido de la pantalla de visualización de un ordenador. En el ángulo superior derecho tenemos un "teclado virtual", que especifica que al teclado ordinario le ha sido asignado el alfabeto árabe. Al pulsar la letra *g*, por ejemplo, el ordenador recibe la arábiga *lam*. Bajo el teclado virtual tenemos un documento en árabe y en inglés. El primero se lee de derecha a izquierda; el segundo, de izquierda a derecha. El ordenador consiente al teclista intercalar un idioma en otro, conservando al propio tiempo la direccionalidad de cada grafía. Bajo el texto bilingüe aparece un grupo de "iconos", que representan elementos auxiliares, impresoras, por ejemplo. En la parte izquierda, un documento muestra al operador los caracteres disponibles.

en que hay solamente $2^8 = 256$ modos de agrupar en octetos ocho cifras de ceros y unos. El número de letras de las grafías vivas del mundo es muy superior. Un sistema de codificación de dos octetos, donde cada letra quedase identificada por dos octetos consecutivos permitiría $2^{16} = 65.536$ posibles códigos; un sistema tri-octeto, 2^{24} códigos, bastante más de 16 millones. Ahora bien, consumir dos o tres octetos por letra, cuando tan sólo hace falta uno, sería derrochar espacio en la memoria del ordenador. La solución es hacer que la codificación tan sólo se amplíe a dos o tres octetos por letra cuando sea inevitable; ello se consigue reservando unos cuantos octetos para que desempeñen el papel de señales inteligibles por el ordenador, e incorporando tales señales en el texto codificado.

El primer paso para establecer un esquema de codificación políglota de textos consiste en asignar a cada uno de los alfabetos del mundo un número binario que lo codifique. Al alfabeto latino se le asigna el octeto 00000000, al griego, 00100110; el cirílico es 00100111, el arábigo, 11100000, etcétera. (La asignación concreta, así como la codificación de cada una de las letras, se basan en una normalización internacional.) Seguidamente, se asigna el código 11111111 a la señal de trasposición de alfabeto. El ordenador ha de empezar suponiendo que el texto se encuentra en el alfabeto 00000000 –es decir, en escritura latina– y cada vez que se encuentre con 11111111 ha de interpretar que el siguiente octeto especifica el nuevo alfabeto, y que los octetos posteriores corresponden a códigos de letras pertenecientes a ese alfabeto [*véase la figura 4*].

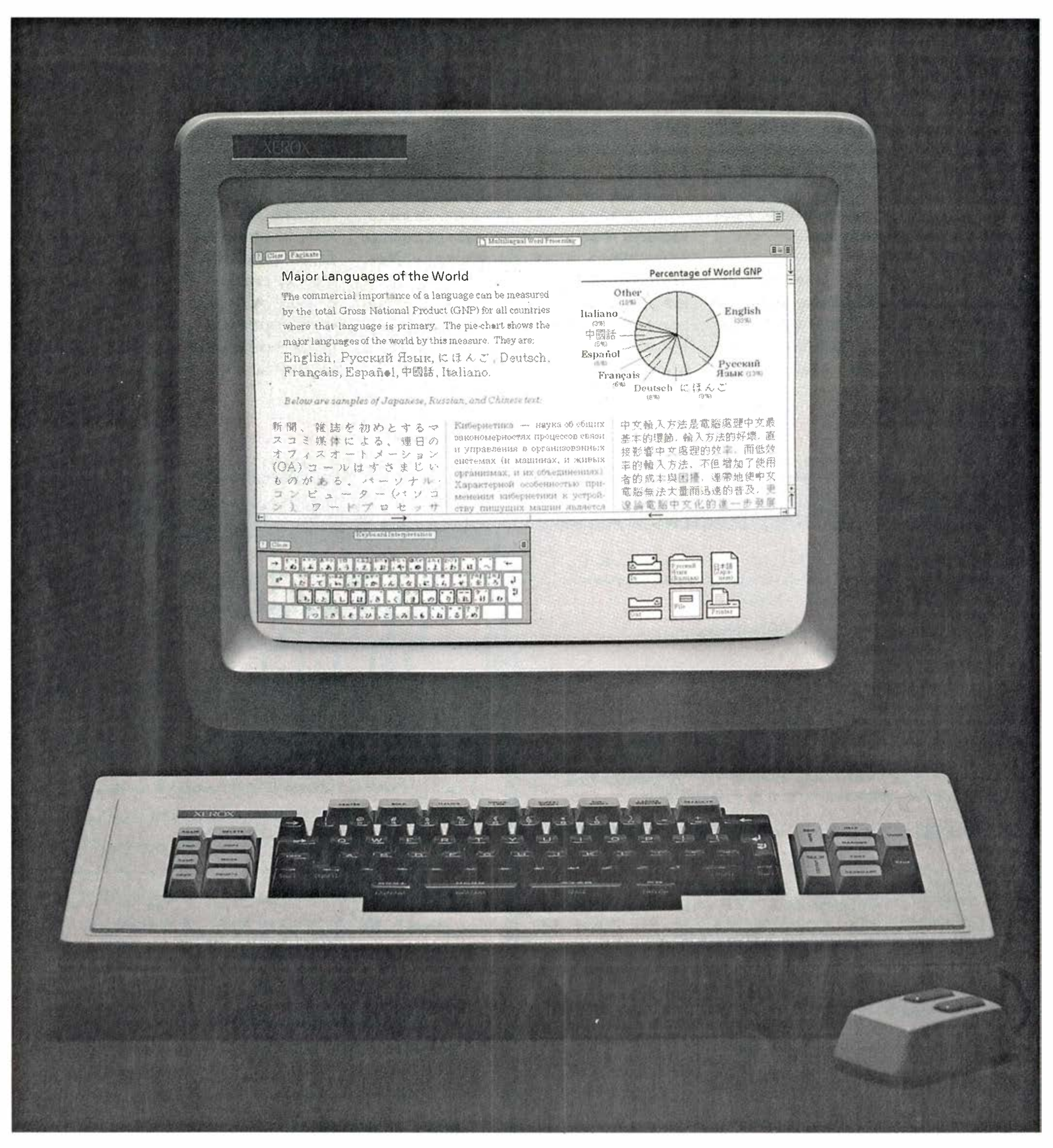
Queda así resuelto el problema de codificación de los textos escritos en caracteres fonéticos; pero resta pendiente el problema de los ideogramas chinos, pues elevan el total de letras por encima de las 65.536 a que el esquema puede dar cabida. Para acomodar en él todos los ideogramas es preciso crear otro nivel en la jerarquía de codificación. Podríamos considerar que un grupo de 65.536 letras constituye un "superalfabeto", y especificar que la señal de transición a superalfabetos está formada por dos octetos 11111111 dados en sucesión. Tal señal haría que el ordenador interpretase el octeto consecutivo como número de código de un nuevo superalfabeto, y los pares de octetos posteriores, como códigos que especifican símbolos de tal superalfabeto. Todo cuanto se precisa entonces es el superalfabeto principal, designado por 00000000, salvo para caracteres chinos muy raros.

La estrategia de "codificación flexible" explicada fue ideada por Gael Curry, de la División de Sistemas de Oficina de la Xerox Corporation; abre el ordenador a una gama de más de 16 millones de caracteres, entre los que se cuentan todos los ideogramas chinos. Al mismo tiempo, realiza en forma óptima la codificación de los alfabetos ordinarios (es decir, los alfabetos fonéticos), asignando un solo octeto



a cada letra. Permite además representar económicamente en el ordenador textos escritos en cualquier mezcolanza de idiomas, en sucesión de octetos.

La secuencia de octetos se almacena en el orden lineal en que el texto se pronuncia; supera así las complejidades gráficas (como variantes en las formas de las letras) y la diversidad de direcciones en que puede escribirse un texto plurilingüe. Lo cual explica un hecho en apariencia sorprendente: el procesamiento que internamente realice el ordenador sobre un texto plurilingüe no queda afectado por la presencia de grafías exóticas. Las operaciones de tratamiento del texto, tales como su corrección y modificación, la búsqueda de determinadas palabras o caracteres que pueda contener y la transmisión electrónica de textos son íntegramente independientes de la forma gráfica del texto; dependen sólo de la sucesión interna de octetos que representa su contenido de información. Los únicos aspectos realmente complejos que deben afrontar los logicales de tratamiento de



2. PUESTO DE TRABAJO informatizado, que dispone de la pantalla cuyo contenido se muestra en la figura 1. El ordenador forma parte de un sistema informático llamado Star, que manufactura la Xerox Corporation. La barra espaciadora del teclado está en realidad dividida en cuatro. Al procesar textos japoneses, esas barras sirven para especificar los tres "alfabetos" japoneses (*katakana*, *hiragana* y *kanji*) o el alfabeto latino ordinario. Delante del teclado vemos un "ratón", conectado al ordenador. Moviendo el ratón sobre el pupitre podemos situar el cursor sobre el punto de la pantalla que convenga.

textos multilingües conciernen al dactilografiado y la presentación o restitución del texto.

Me fijaré ahora en el dactilografiado. En casi todos los idiomas, tal proceso resulta sencillo, ya que casi todos los alfabetos de los distintos idiomas caben cómodamente en un teclado normal de máquina de escribir. Más todavía, con mecanografía computarizada resulta sencillo construir programas que consientan cambiar la "interpretación" que el ordenador da a cada letra, con lo que el mecanografiado se hace en otro idioma. Por ejemplo, podemos hacer que al pulsar la letra *A* de nuestro teclado el ordenador almacene el carácter cirílico Ф o la letra arábiga ش, según la interpretación del teclado. El ordenador puede incluso proyectar en su pantalla un pequeño diagrama, conocido por teclado virtual, que recuerde al teclista qué alfabeto está en ese instante asignado al teclado y qué tecla corresponde a cada letra.

En ciertos idiomas, el ordenador puede incluso simplificar la operación de mecanografiado. La escritura arábiga, por ejemplo, contiene un carácter combinado especial, que remplaza a las *lam* y *alif* siempre que ambas aparezcan en sucesión. En las máquinas de escribir árabe, este carácter especial tiene reservada su propia tecla. El ordenador, al poder sustituir automáticamente todas las combinaciones *lam-alif* por el carácter especial, hace superflua tal tecla. El ordenador es también capaz de manejar letras que cambien de grafía según el contexto. Con logicales adecuados para tales grafías, el mecanógrafo sólo tiene que ir introduciendo la sucesión natural (fonética) de caracteres; el ordenador asumirá la tarea de manipulación de las complicaciones ortográficas.

Existe un sistema de escritura, ampliamente utilizado, cuya complejidad desafía incluso a la potencia de los ordenadores. Se trata del sistema ideográfico empleado en la escritura china, japonesa y, en ocasiones, en la coreana. Los caracteres ideográficos chinos, que podemos adecuadamente describir con el término japonés *kanji*, tuvieron su origen en pictogramas creados hace más de 4000 años, que adoptaron su forma actual hace unos 2000. Unos 500 años más tarde, los japoneses y coreanos adoptaron el idioma chino para uso oficial y académico. A fin de escribir el idioma nativo idearon letras de significado fonético, que en Japón fueron los caracteres *kana* (*hiragana* y *katakana*) y



3. LAS LENGUAS VIVAS suscitan difíciles problemas de tratamiento de textos. El mongol se escribe verticalmente (*a*). La muestra dice: *Erte togha tomshi ugei, nogchigsen galab-un urida anu*, es decir, "Erase una vez, hace incontables años..." El árabe (*b*) se escribe de derecha a izquierda, en volutas descendentes. La muestra dice *najmu-l-fajri*, "estrella del amanecer". El hebreo (*c*) se escribe también de derecha a izquierda, y sus letras llevan diversas marcas. La palabra presentada es *ba'asher*, "donde". En griego (*d*), una de las letras, la *sigma* (*flechas de color*), tiene a final de palabra una forma especial. Aquí tenemos la palabra *ásjemos*, "feo". En árabe (*e*) ciertas letras se combinan. La palabra es *al-islam*, "el Islam". El hindi (*f*) tiene letras cuyo orden de escritura es distinto del orden fonético. La palabra es *hindî*; pero su grafía es *ihndî*. En thai (*g*) las vocales pueden rodear a las consonantes. La palabra escrita es *deuan*, "mes"; la letra *eua* está escindida en tres partes. El coreano (*h*) se caracteriza por sus apiñamientos silábicos. La muestra se lee: *han-gug-ŏ*, o sea "lengua coreana". La escritura china (*i*) se vale de millares de idiogramas. Los ejemplos aquí mostrados dicen ambos: *zhong-guo-hua*, "lengua china".

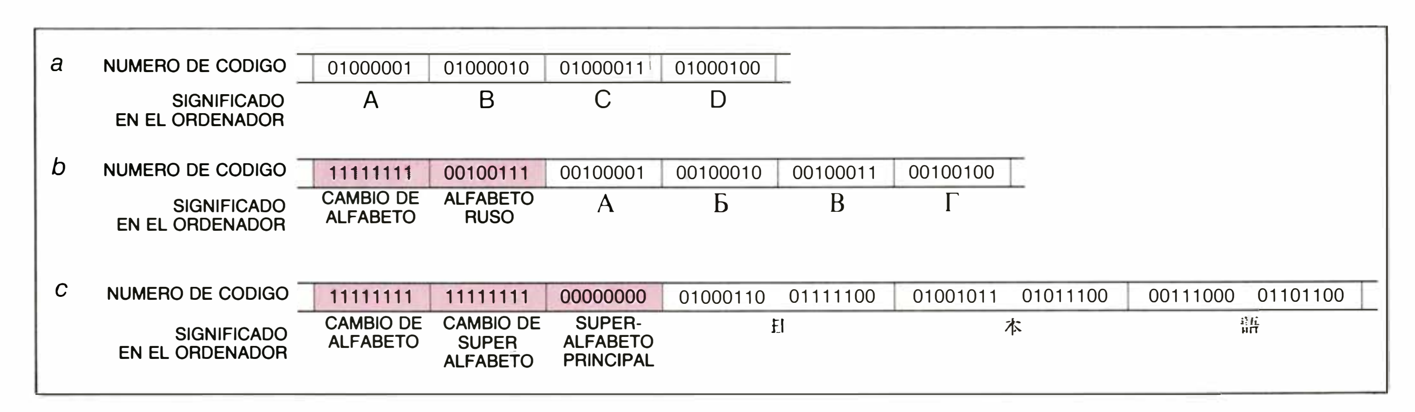
en Corea, los *hangul*. Desde el primer momento, los caracteres chinos resultaron inadecuados para la escritura del idioma nativo; ahora eran, además, innecesarios. Empero, el gran prestigio de la cultura china condujo a formas mixtas de escritura. En nuestros días, el uso principal de los alfabetos fonéticos en Japón y Corea es para escribir las terminaciones inflexionales y las desinencias de las palabras (terminaciones y sufijos que recuerdan las desinencias *-ado, -ando*, etcétera, de nuestro idioma). Para la escritura de los radicales se utiliza *kanji*. En Japón está en declive el número de *kanji* de uso común en textos impresos: se ha limitado en unos 3500, la mitad de los que suelen emplearse en China.

Su peculiar historia hace del idioma japonés el de escritura más compleja del mundo, y continúa siendo una mezcla de ideogramas *kanji* y letras fonéticas *kana*. Los japoneses carecen de procedimientos razonables para mecanografiar su idioma; más del 90 por ciento de los documentos japoneses se escriben a mano y casi podríamos decir que se dibujan. Un desliz de la mano del escriba puede echar a perder una página. Por otra parte, la lectura de la mayoría de los documentos resulta difícil, a menos que el escriba sea consumado calígrafo. Cierto es que existe una máquina de escribir *kanji*, bastante parecida a una linotipia pequeña; pero tal ingenio es lento, y su empleo, fatigoso. No abundan los mecanógrafos profesionales, y su rendimiento es de unos 20 caracteres por minuto, 10 páginas al día.

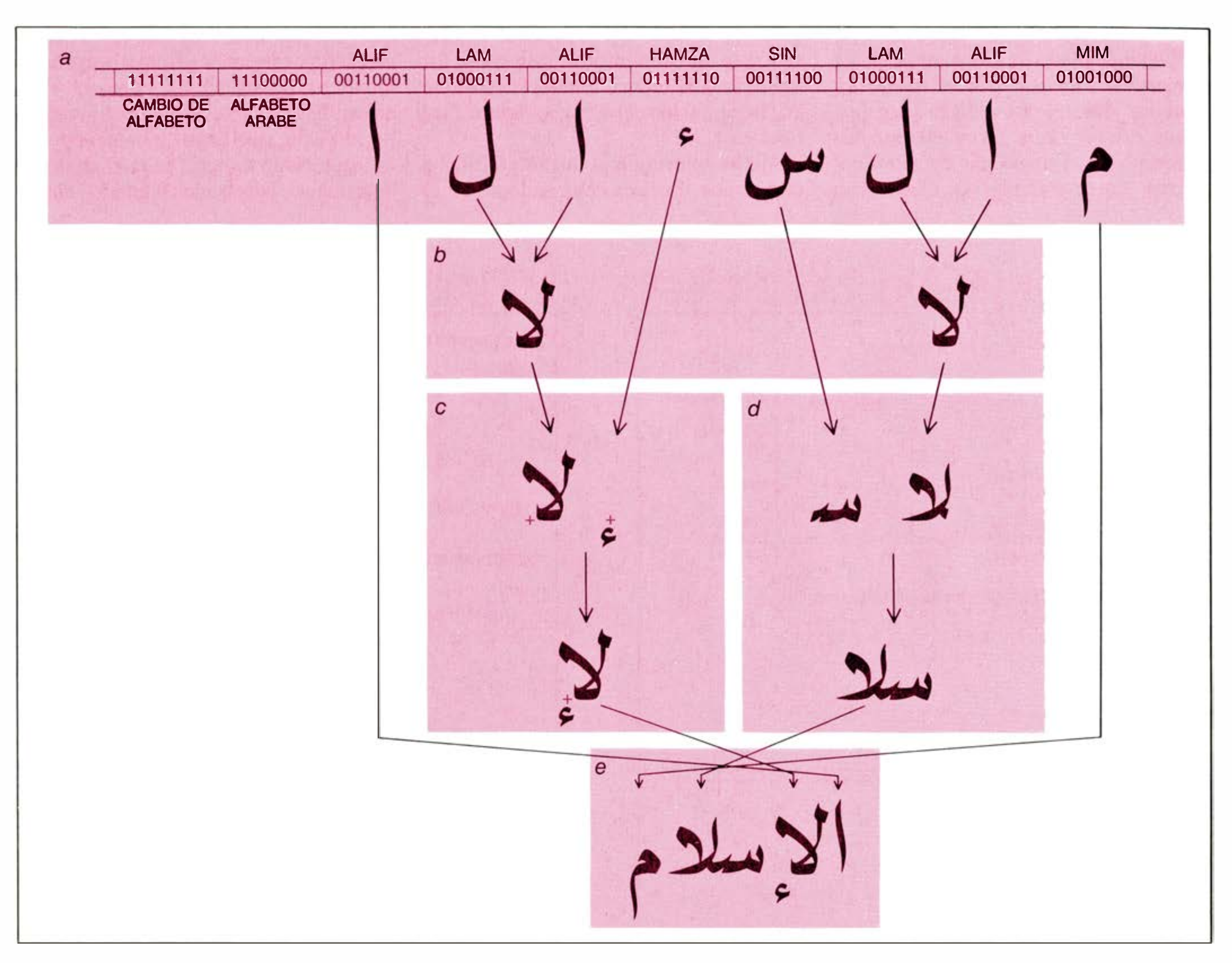
Hisao Yamada, de la Universidad de Tokio, estudioso especialista en historia social de la mecanografía, hace notar que no es fácil que una sociedad se plantee un sistema de mecanografía útil cuando anteriormente no ha dispuesto de ninguno. En los Estados Unidos, al inventor de la máquina de escribir jamás se le ocurrió que su ingenio pudiera utilizarse para escribir a gran velocidad; la mecanografía al tacto (en la que los diez dedos están en contacto con el teclado) no se ideó hasta 14 años después de patentarse la máquina de escribir. En Asia, la situación tiene mucho en común. Los primeros procedimientos de introducción de *kanji* en ordenador no estuvieron bien concebidos. Algunos métodos utilizaban teclados con varios cientos de teclas, con diversos caracteres cada una. Las pulsaba la mano derecha, al tiempo que la izquierda manipulaba un banco de teclas de transposición, que especificaba cuál era el carácter elegido con la derecha. Otros métodos requieren que el operador analice cada carácter *kanji* y pulse luego cierta sucesión de símbolos de codificación, lo que resulta todavía más fatigoso y agotador que la búsqueda entre centenares de teclas.

En años recientes ha aparecido un nuevo procedimiento para la mecanografía del *kanji*; se adapta tan bien al teclista ordinario que lo están adoptando la mayoría de los fabricantes japoneses. Permite, en efecto, escribir al tacto, a razón de unos 50 caracteres por minuto, los mecanógrafos corrientes, y hasta unos 150 los más veloces y expertos. El método, llamado de conversión fonética, consta de tres etapas, que permiten a los japoneses dactilografiar fonéticamente su idioma. El mecanógrafo va tecleando las palabras en símbolos fonéticos *hiragana*. (La descomposición literal de las palabras según el alfabeto fonético la aprenden los japoneses en la infancia.) Para transformar la descomposición fonética en caracteres *kanji*, el mecanógrafo pulsa una tecla de "consulta" especial, y el ordenador se encarga de buscar la expresión *kanji* en un diccionario registrado en un disco magnético de memoria. Si varias palabras tienen la misma descomposición fonética, o esa palabra tiene varias denotaciones *kanji* (lo que acontece en un 40 por ciento de las veces), el ordenador asigna cada alternativa a una tecla de un teclado virtual; el operador elige entre ellas la adecuada.

La dactilografía por conversión fonética se vale de un teclado normal de máquina de escribir. Los caracteres *hiragana* se adaptan perfectamente a tal teclado; tanto así, que su disposición ya está normalizada. No obstante, muchos japoneses se han familiarizado ya con el teclado latino ordinario, y les molesta aprenderse otra organización. En consideración a sus preferencias, muchos sistemas de conversión fonética ofrecen un método de datilografía en *hiragana* llamado "conversión *romaji*". *Romaji* significa utilizar las letras del alfabeto latino para descomponer fonéticamente palabras japonesas. Palabras como *Fuji, sayonara, samurai* y una pléyade de otras más son expresiones *romaji* que los occidentales conocemos bien. También las conocen la mayoría de los japoneses. Así, para mecanografiar la palabra que nosotros escribimos *sushi* el dactilógrafo se limita a teclear *s u s h i*. El ordenador se encarga entonces de convertirlo, primero, en *hiragana* すし, y seguidamente, en *kanji* 寿司. Si se le ofrece la oportunidad de



4. UNA CODIFICACION FLEXIBLE permite acomodar todos los sistemas de escritura del mundo haciendo mínima la longitud de la secuencia de dígitos binarios (*bits*) que representan en la memoria de un ordenador un texto multilingüe. Para el alfabeto latino se dispone de un código normalizado, el ASCII (American Standard Code for Information Interchange), que asigna a cada carácter un octeto (*byte*) de *bits*. Para otros alfabetos, como el ruso, por ejemplo (*b*), el octeto 11111111 actúa de señal de "conversión de alfabeto", instruyendo al ordenador de que debe interpretar el siguiente octeto como código de especificación de nuevo alfabeto y, los octetos que vengan a continuación, como caracteres de ese alfabeto. Para el chino y el japonés (*c*) se precisa de un esquema más complicado. Dos octetos 11111111 sucesivos actúan de conversión a "superalfabetos", el octeto siguiente especifica un superalfabeto determinado y los subsiguientes, tomados por pares, caracteres del superalfabeto. De este modo alojan en un teclado convencional multitud de caracteres.



5. PRESENTACION DEL TEXTO; consiste en proyectarlo sobre una pantalla o imprimirlo sobre una hoja. La presentación de la palabra árabe *al-islam* ya nos da idea de algunas de las dificultades. Almacenada en la memoria del ordenador, la palabra no es más que una secuencia de ocho letras (*a*). Su adecuada presentación requiere ciertas tareas computacionales. Primero, el ordenador halla dos ejemplos en que *lam* y *alif* están contiguas; la escritura árabe exige que esta combinación se remplace por una única ligadura, muy parecida a la letra griega *gamma* (*b*). El ordenador "toma nota" de este hecho en una memoria temporal; los códigos de texto originalmente almacenados permanecen intactos. Seguidamente, el ordenador busca pequeños caracteres distintivos, como *hamza*, que han de situarse por encima o por debajo de otras letras. Las diminutas crucecitas de color de la ilustración son marcas de registro (*c*). En tercer lugar, el ordenador busca las letras que han de empalmarse, y que por tanto reciben formas especiales (*d*). Finalmente, el ordenador proyecta la palabra, o la imprime en papel, en el orden correcto, de derecha a izquierda (*e*), pese a que en la memoria se almacenan de izquierda a derecha.

elegir entre dactilografiar *hiragana* en un teclado normalizado japonés, o *romaji* en un teclado latino ordinario, nueve de cada diez usuarios japoneses prefieren la segunda opción.

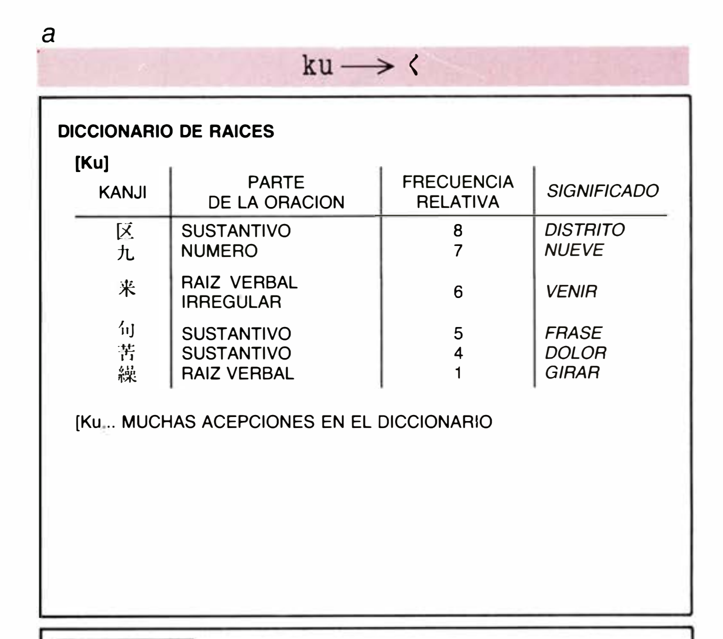
La segunda etapa de la dactilografía por conversión fonética –la búsqueda que el ordenador ha de efectuar en un diccionario– se complica mucho en razón de las desinencias del idioma japonés, un tanto semejantes a las de idiomas europeos. (Por ejemplo, *aruku* significa "andar"; *aruita*, "andaba", y *aruite*, "andando".) El diccionario puede contener bastante más de 100.000 radicales lexicográficos. Con sus declinaciones e inflexiones, el número de palabras habría de contarse por millones. Como es obvio, el ordenador no puede almacenarlas todas. El problema se resuelve con ayuda de lógicales que se valen de una gramática de las inflexiones japonesas para analizar la descomposición fonética que suministra el mecanógrafo [*véase la figura 6*]. En esencia, se pretende que el ordenador conozca la gramática del idioma que se le está mecanografiando.

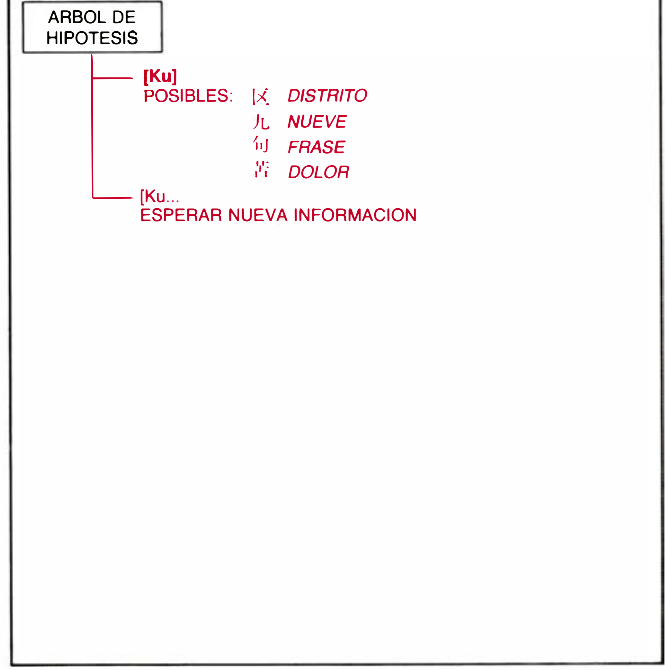
La principal ventaja de la dactilografía por conversión fonética estriba en que el ordenador analiza lo dactilografiado palabra por palabra, en lugar de un *kanji* por vez. Fijémonos en la naturaleza de los *kanji*. Es cierto que cada *kanji* expresa un solo concepto, pero también lo es que la mayoría de las palabras chinas, japonesas y coreanas son composición de dos de tales conceptos (y consiguientemente, de dos *kanji*), de forma análoga a nuestras *bocamanga* y *ferrocarril*. Tal composición permite crear muchas más palabras que caracteres hay en *kanji*. Reduce, además, la ambigüedad fonética del lenguaje. Por ejemplo, un diccionario japonés enumera 64 *kanji* de uso común que se pronuncian *tou*, y otros 53, igualmente comunes, que se pronuncian *kyou*, mas solamente una palabra compuesta pronunciada *toukyou*, a saber, 東京, o "capital oriental", nombre de la ciudad de Tokio. En vista de las alternativas, cada *kanji* de la palabra compuesta determina unívocamente al otro.

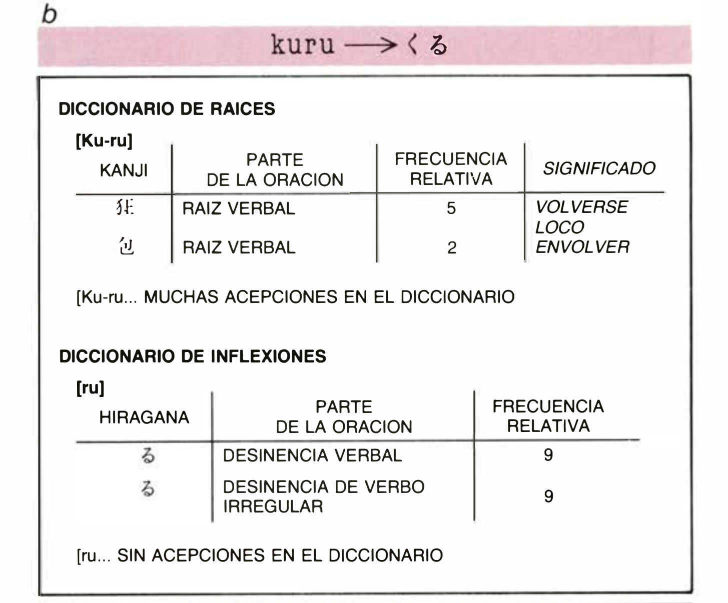
Fijémonos, pues, en la forma en que se dactilografía *toukyou*. Cuando se dactilografía 東京 a razón de un *kanji* por vez, el mecanógrafo debe, por algún procedimiento, elegir el *tou*

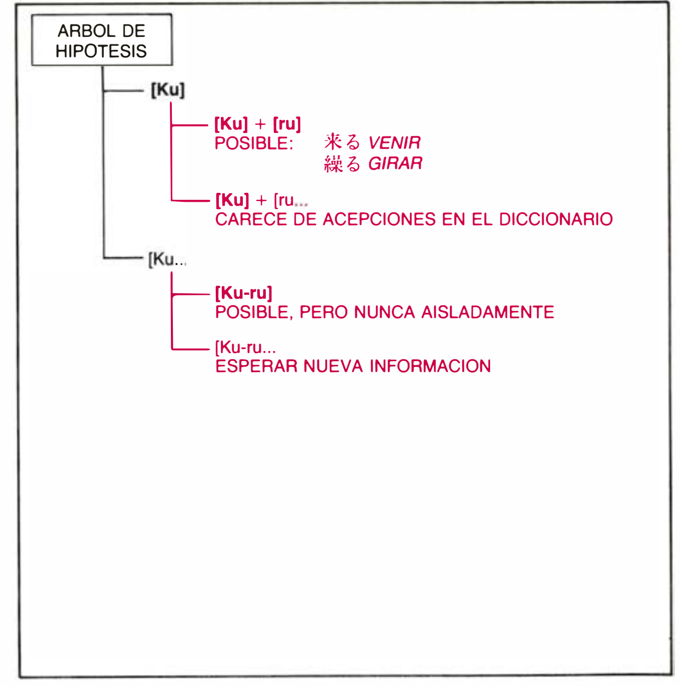
correcto de entre las 64 alternativas, y el *kyou* apropiado de entre otras 53. La conversión fonética, por el contrario, requiere únicamente pulsar sucesivamente *t o u k y o u*. El ordenador responderá con el único par de *kanji* correctos. La creación de un diccionario para uso interno del ordenador confiere a éste una rica información sobre los *kanji*, lo cual reduce mucho la cantidad de información que debe aportar el operador.

Me he referido a la dactilografía por conversión fonética centrándome en el caso del japonés, lenguaje en el que se empleó por primera vez, pero su efectividad es la misma en coreano y en chino. Es probable, por lo que al coreano respecta, que llegue a hacerse popular un teclado *hangul*; para el chino, el deletreado latinizado llamado *pinyin*





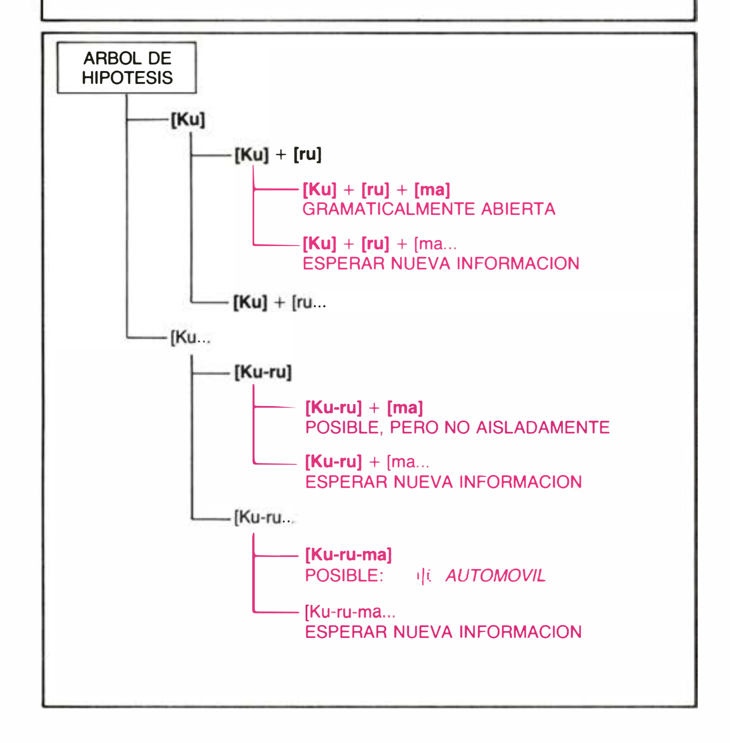




6. EL PROCESAMIENTO DEL JAPONES pone a prueba la capacidad del ordenador, porque el idioma japonés es una compleja mezcla de millares de *kanji* (símbolos ideográficos tomados de los chinos) y de docenas de *kana* (símbolos fonéticos autóctonos). El operador está aquí tecleando *kurumade*, que significa "en coche". La dactilografía se hace en *romaji*, es decir, mediante un teclado latino ordinario, preferida por los japoneses. Así, el mecanógrafo pulsa primero las teclas *k* y *u*. El ordenador traduce inmediatamente el grupo *ku* en un único carácter *kana*. Entretanto, el ordenador consulta un diccionario interno, buscando entradas exclusivamente formadas por *ku* (*letras en negrita entre corchetes*) y entradas que comiencen por *ku* (*en tipo fino, con solo corchete a la izquierda*). A partir de estas entradas construye un "árbol de hipótesis". El proceso continúa (*b*) al pulsar el mecanógrafo las letras *r* y *u* y completar la segunda sílaba de *kurumade*. Nuevamente, el ordenador traduce el *romaji* en *kana*. El resultado es una cadena de dos caracteres *kana*. El ordenador consulta entonces el diccionario interno. Las posibilidades son más variadas. *Kuru* podría ser una palabra completa. *Ku* podría también ser el comienzo de una palabra; y *ru*, su inflexión o desinencia, como en español *-ado*, *-endo*, etcétera. Finalmente, *ku* podría ser una raíz y *ru* el comienzo de una inflexión. Algunas de las posibilidades se descartan, por carecer el diccionario de tales entradas; otras mantienen su validez. En consecuencia, del árbol de hipótesis brotan nuevas ramas (*color*). La tercera etapa del proceso (*c*) se inicia al pulsarse las teclas *m* y *a*. El ordenador tiene ahora una cadena de tres *kana*, a partir de la cual construye las correspondientes adiciones al árbol de hipótesis. Algunas de las adiciones son verosímiles, aunque improbables. En particular, la raíz *ku* más la inflexión *ru* pudiera en principio actuar como participio activo o adjetivo, con el significado de "viniente" o "girato-

quizá llegue a desempeñar papel análogo al *romaji* japonés. Por ejemplo, el nombre de la ciudad de Beijing puede teclearse sin más *b e i j i n g*. Cierto es que en chino cada sílaba tiene una determinada pauta tonal, y que al teclear como se ha explicado, tal pauta queda sin especificar. Empero, la ambigüedad que ello provoca se reduce a dos alternativas: 背景, que significaría "fondo", y 北京, "capital del norte". Le resulta mucho más cómodo al teclista decidir entre alternativas de este jaez que codificar explícitamente el tono de cada sílaba. El chino padece la complicación adicional de tener numerosos dialectos de pronunciaciones ampliamente diferentes; de todos modos, la pronunciación normalizada del chino mandarín se enseña en todo el mundo y constituye la pronunciación nativa de

c



d

kurumade → くるまで

DICCIONARIO DE RAICES

[Ku-ru-ma-de] SIN ACEPCION EN EL DICCIONARIO

[Ku-ru-ma-de] SIN ACEPCION EN EL DICCIONARIO

DICCIONARIO DE INFLEXIONES

[de]

HIRAGANA	PARTE DE LA ORACION	FRECUENCIA RELATIVA
で	DESINENCIA VERBAL	9
で	DESINEN. VERBO "SER"	9
で	PARTICULA NOMINATIVA	9

[de... MUCHAS ACEPCIONES EN EL DICCIONARIO

[ma-de]

HIRAGANA	PARTE DE LA ORACION	FRECUENCIA RELATIVA
まで	AUXILIAR VERBAL	9
まで	PARTICULA NOMINATIVA	9
まで	AUXILIAR NUMERICO	6

[ma-de... SIN ACEPCIONES EN EL DICCIONARIO

ARBOL DE HIPOTESIS

[Ku]
- **[Ku]** + **[ru]**
  - **[Ku]** + **[ru]** + **[ma]**
  - **[Ku]** + **[ru]** + [ma...
    - **[Ku]** + **[ru]** + **[ma-de]** POSIBLE: 来るまで HASTA VENIR; 繰るまで HASTA GIRAR
    - **[Ku]** + **[ru]** + [ma-de.. SIN ACEPCIONES EN EL DICCIONARIO
- **[Ku]** + [ru...

[Ku...
- **[Ku-ru]**
  - **[Ku-ru]** + **[ma]**
    - **[Ku-ru]** + **[ma]** + **[de]** GRAMATICALMENTE IMPOSIBLE
    - **[Ku-ru]** + **[ma]** + **[de..** ESPERAR NUEVA INFORMACION
  - **[Ku-ru]** + [ma...
    - **[ku-ru]** + **[ma + de]** GRAMATICALMENTE IMPOSIBLE
    - **[Ku-ru]** + [ma-de... SIN ACEPCIONES EN EL DICCIONARIO
- [Ku-ru...
  - **[Ku-ru-ma]**
    - **[Ku-ru-ma]** + **de]** POSIBLE: 車で EN COCHE
    - **[Ku-ru-ma]** + [de... ESPERAR NUEVA INFORMACION
  - [Ku-ru-ma...
    - **[Ku-ru-ma-de]** SIN ACEPCION EN EL DICCIONARIO
    - [Ku-ru-ma-de... SIN ACEPCION EN EL DICCIONARIO

rio" (en el sentido de "torcer hilo") y pudiera por tanto modificar algún sustantivo. El ordenador retornará a esta interpretación infrecuente tan sólo en caso de que de las posteriores entradas desde el teclado no emerja nada más concreto. El árbol ha alcanzado su máxima complejidad; al teclear nuevas sílabas se introducirán nuevas hipótesis, pero casi todas ellas las eliminarán restricciones lingüísticas, como la imposibilidad gramatical. La cuarta fase del proceso (*d*) ocurre cuando el mecanógrafo pulsa las letras *d* y *e*, que completan la serie alfabética *kurumade* y proporcionan al ordenador una secuencia de cuatro *kana*. El ordenador consulta una última vez su diccionario interno; la información recogida en él limita las posibilidades. La raíz *ku*, seguida de las desinencias *ru* y *made*, es admisible: pudiera significar "hasta venir" o "hasta hacer girar". La raíz *kuruma*, seguida de *de* es concebible: significa "en coche". El último paso del tratamiento se muestra en la figura 7.

750 millones de posibles mecanógrafos.

He descrito cómo podemos dactilografiar y almacenar en la memoria de un ordenador textos plurilingües. Abordaré ahora el tercer aspecto del tratamiento políglota de textos, a saber, la presentación o restitución del texto que se encuentra almacenado en el ordenador. Para el tratamiento de textos en español existe una correspondencia biunívoca sencilla entre los números de código utilizados para almacenamiento y los caracteres presentados en la pantalla o la hoja impresa. En logicales universalmente políglotas, sin embargo, es forzoso abandonar tal correspondencia y sustituirla por un esquema mucho más rico. Cuando el ordenador procese una secuencia de códigos de texto para restituirla, habrá que darle la capacidad de examinar un número cualquiera de códigos consecutivos, de una sola vez, y será preciso permitirle realizar cualesquiera cálculos encaminados a elegir las formas gráficas y la posición que habrán de ocupar los caracteres. En particular, será preciso dotar al ordenador de las diversas variantes que toma la forma de los caracteres, que, como acontece en muchos sistemas de escritura, suele ser mudable.

La manipulación de la letra griega *sigma* (σ), que adopta una forma especial (ς) cuando aparece al final de una palabra, nos proporciona un ejemplo de aplicación de estas ideas. En el ordenador, todas las *sigma* se almacenan con el código de la *sigma* ordinaria, aparezcan o no al final de palabra. Sin embargo, siempre que se le pide al ordenador que presente una *sigma*, éste examina antes el carácter que sigue. Si descubre que la *sigma* ocupa la posición final de la palabra, el ordenador la presenta en la forma modificada, en lugar de la ordinaria.

Hay en árabe ejemplos más complejos. La mayoría de las letras arábigas tienen cuatro formas, según la letra se encuentre sola, al comienzo, en el interior o en el extremo de la palabra. Además, las reglas para enlazar las letras árabes con sus vecinas han de acomodarse a la presencia de pequeñas marcas ortográficas situadas por encima o debajo de las letras. La solución es, empero, muy semejante: instruir al ordenador para que examine el contexto de cada letra antes de determinar el aspecto de la letra a presentar. Pueden tomarse en consideración todas las contingencias, pues el ordenador es capaz de efectuar cualquier cálculo para determinar el aspecto final del texto.

Las ligaduras, en las cuales dos o más letras se funden y forman en su presentación un único carácter, son también elementos importantes. En la mayoría de los juegos de tipos de imprenta (incluido el utilizado para la composición de este artículo) se dispone de formas ligadas para unas cuantas combinaciones frecuentes de las letras, particularmente los grupos *ff, ffi, fi, fl,* y *ffl*. Los logicales capaces de tomar en cuenta el contexto de cada letra podrán instruir al ordenador de que presente la palabra *office* con cuatro caracteres –*o*, *ffi*, *c, e*– mientras que en la memoria del ordenador se conservan los seis necesarios *o f f i c e*) para procesar correctamente la palabra.

Enfoque similar puede adoptarse respecto de acentos (agudo, grave y circunflejo), y marcas diacríticas, como las diéresis o la tilde. La Organización Internacional para la Normalización (International Organization for Standards) exige que tales marcas queden representadas en el ordenador mediante códigos propios, que anteceden al de la letra por ellos afectada. Por tanto, la letra *ü* se representa mediante dos octetos. El mismo proceso que permite al ordenador presentar los dos octetos *f* e *i* mediante la ligadura *fi* sirve para que los dos octetos ¨ y *u* queden presenta-

a
くるまで + "TECLA DE CONSULTA"

b
Keyboard Interpretation
? Close
車で
来るまで

c
車で

7. PASO FINAL del procesamiento de *kurumade*. Se produce, después de haberse tecleado la palabra en *romaji*, al pulsar el mecanógrafo una "tecla de consulta" especial (*a*). En el interior del ordenador se descartan las ramas muertas del árbol de hipótesis. Se invalidan y eliminan las ramas en expectativa, y lo mismo las interpretaciones excepcionales. Las hipótesis se ordenan por su frecuencia de aparición en japonés; después, las más verosímiles (en este caso, las que significan "en coche" y "hasta venir") se proyectan sobre un teclado virtual (*b*). Las raíces se presentan en *kanji*; las desinencias siguen en *kana*. Las posibilidades que resulten sumamente inverosímiles (como la que aquí significa "hasta hacer girar") no se presentan, salvo que vuelva a pulsarse la tecla de consulta. Cuando el mecanógrafo elige una alternativa, se remplaza por ella la cadena de cuatro *kana* (*c*). (Los dibujos son de Edward Bell.)

dos por el único carácter *ü*. En ciertas grafías es necesario aplicar marcas múltiples, por encima o debajo de un carácter base; el ordenador puede gestionar este problema mediante un procedimiento de presentación más complejo.

Incluso los singulares cúmulos silábicos característicos de la grafía coreana *hangul* admiten correcta presentación si al ordenador se le proporcionan logicales adecuados, más las formas mutantes de las letras coreanas necesarias para la presentación, que puede construir en agrupaciones cuadradas. De igual manera, es posible restituir los trazos descendentes oblicuos hasta una línea de base, tan característicos de las fuentes tipográficas arábigas, que liberan la mecanografía árabe del encorsetamiento de los renglones horizontales planos. En el idioma hindi, la propia palabra *hindî* tiene la primera vocal (*i*) desplazada de su posición fonética, pues está situada antes de la consonante inicial (*h*). Empero, al integrar en las instrucciones del ordenador la regla de colocación de la vocal, el mecanógrafo puede teclear la palabra en su orden fonético natural, encargándose el ordenador de situar automáticamente la *i* antes de la *h* al presentar la palabra. La misma técnica puede incluso racionalizar la manipulación de grafías como la thai, en la que las vocales pueden llegar a descomponerse en fragmentos que rodeen a una letra vecina.

Equipado de flexibilidad suficiente en el proceso de restitución, el ordenador puede habérselas con cualquiera de los casos en que las letras tienen efectos contextuales unas sobre otras. El único problema de presentación que aún subsiste es de mayor amplitud: ¿cómo podrá el ordenador mezclar grafías que corran en direcciones distintas?

Los ordenadores no pueden hacer lo imposible; no existen procedimientos razonables para mezclar en un mismo párrafo textos verticales y horizontales. Por tradición, el chino, el japonés y el coreano se escriben verticalmente. Los impresores asiáticos, no obstante, han adoptado el hábito de imprimirlos horizontalmente, de izquierda a derecha. También el idioma mongólico es vertical por tradición. Pero los impresores locales hacen girar el texto 90 grados cuando es necesario combinarlo con otros textos horizontales.

En suma, la usanza tipográfica impone que todos los idiomas se impriman horizontalmente si ello es necesario. La única circunstancia que al ordenador le queda por resolver es la mezcolanza de grafías horizontales escritas de izquierda a derecha con otras que corran de derecha a izquierda, como la arábiga. El mecanógrafo prefiere teclear las palabras en su orden fonético habitual y hacerlas aparecer en la sucesión de diestra a siniestra adecuada, y ello incluso si vienen insertas en texto latino. Recíprocamente, al mecanografiar un párrafo en alfabeto latino se quiere verlo aparecer correctamente de izquierda a derecha, incluso en el seno del texto árabe.

El problema puede parecer desconcertante, pero no lo es tanto desde la perspectiva del ordenador. El ordenador es mucho más veloz que el mecanógrafo; casi todo su tiempo lo consume esperando a que el operador pulse el carácter siguiente. Entre dos pulsaciones, el texto se presenta estáticamente en la pantalla. Los impresores de libros y revistas en que aparecen grafías arábiga o hebraica junto con otras europeas están habituados a habérselas con textos de doble dirección.

Introducidos en el ordenador, los textos de direcciones entremezcladas pueden experimentar notables transformaciones. En casi todos los procesadores de textos, el lugar donde habrá de aparecer la siguiente letra que se pulse lo señala un cursor. Conforme va creciendo el texto, el cursor va desplazándose hacia un lado. Cuando el renglón está lleno, y el cursor alcanza un margen, desciende automáticamente hasta el comienzo de la línea siguiente. Cuando todo el texto dactilografiado está en alfabeto latino, el cursor se desplaza siempre de izquierda a derecha. Al dactilografiar texto exclusivamente árabe, habrá de moverse de derecha a izquierda. Pero cuando el texto es bidireccional, por ser mixto, la actividad del cursor es distinta. Durante el dactilografiado del texto inglés inserto en el árabe, el cursor permanece inmóvil, y el texto recién introducido va separándose de él. Como es obvio, el cursor, quieto, no puede alcanzar el margen. Aún así, al llenarse la línea, el cursor y todas las palabras subsiguientes han de caer al renglón siguiente. El mecanógrafo tiene la curiosa impresión de que el texto se desploma desde el centro del renglón. Empero, tal desplome crea la organización correcta en el texto bidireccional.

En la corrección de textos de dirección mixta se presentan efectos aún más llamativos. Fijémonos en la frase bilingüe "Las palabras *al-islam* y *al-*

T	01010100
h	01101000
e	01100101
	00100000
w	01110111
o	01101111
r	01110010
d	01100100
s	01110011
	00100000
	11111111
	11100000
ا	00110001
ل	01000111
ا	00110001
ء	01111110
س	00111100
ل	01000111
ا	00110001
م	01001000
	11111111
	00000000
	00100000
a	01100001
n	01101110
d	01100100
	00100000
	11111111
	11100000
ا	00110001
ل	01000111
ع	01000010
ر	00111010
ب	00110010
	11111111
	00000000
	00100000
m	01101101
e	01100101
a	01100001
n	01101110
	00100000
I	01001001
s	01110011
l	01101100
a	01100001
m	01101101

T	01010100
h	01101000
e	01100101
	00100000
w	01110111
o	01101111
r	01110010
d	01100100
s	01110011
	00100000
	11111111
	11100000
ا	00110001
ل	01000111
ا	00110001
ء	01111110
س	00111100
ل	01000111
ا	00110001
م	01001000
	00110000
و	01001011
	00110000
ا	00110001
ل	01000111
ع	01000010
ر	00111010
ب	00110010
	11111111
	00000000
	00100000
m	01101101
e	01100101
a	01100001
n	01101110
	00100000
I	01001001
s	01110011
l	01101100
a	01100001
m	01101101

8. TEXTO BILINGÜE almacenado en el ordenador. No plantea problemas especiales al tratamiento de textos plurilingües. El texto aquí mostrado contiene la frase "The words *al-islam* and *al-'arab* mean Islam and the Arabs"; las palabras árabes están escritas en árabe. Las inglesas, en inglés. La frase se almacena en su orden fonético (*izquierda*), a pesar de que en la presentación los caracteres arábigos se escriben de derecha a izquierda, mientras que el texto en inglés se escribe de izquierda a derecha. Ciertos octetos (*en color*) son códigos especiales, encargados de la conversión y especificación de alfabetos. Al corregir la frase (*derecha*) y hacer que la palabra inglesa *and* se remplace por su equivalente árabe, el único cambio que sufre el texto almacenado es la supresión de los octetos que especifican las letras *a*, *n*, *d*, junto con ciertos códigos especiales de conversión, amén de la inserción del código correspondiente a la letra árabe *wa*.

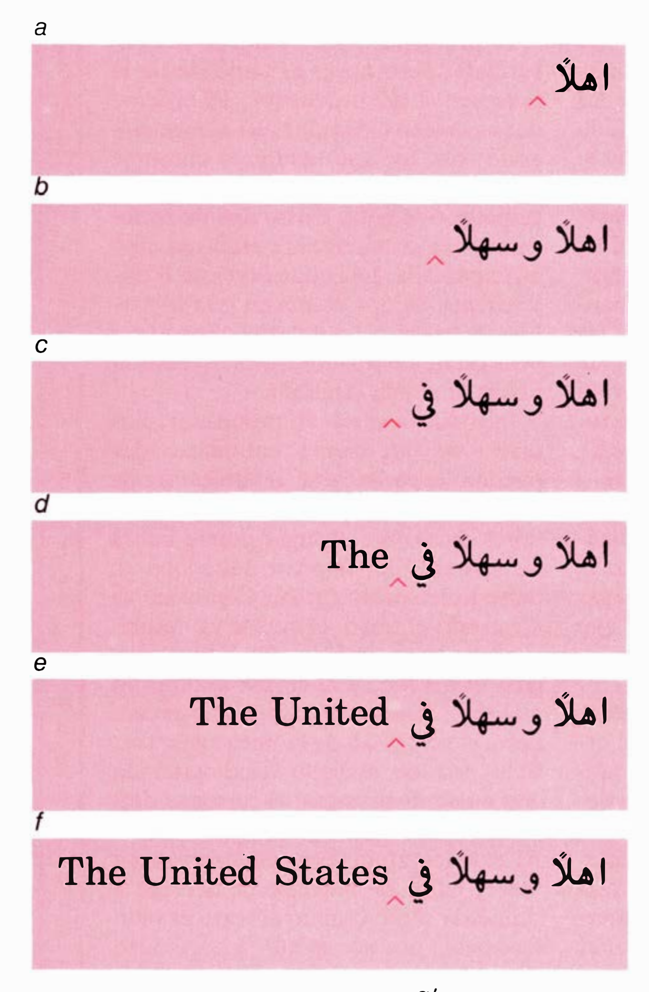
T h e w o r d s ا ل إ س ل ا م a n d ا ل ع ر ب m e a n I s l a m a n d t h e ...

T h e w o r d s ا ل إ س ل ا م و ا ل ع ر ب m e a n I s l a m a n d t h e ...

The words الإسلام and العرب mean Islam and the Arabs.

The words الإسلام و العرب mean Islam and the Arabs.

9. EN LA PRESENTACION DEL TEXTO almacenado que vimos en la figura 8 sí se produce una importante consecuencia. El cambio efectuado solamente afecta a la palabra inglesa *and*, como vemos en lo alto de esta ilustración. Empero, al volcar en pantalla o imprimir el texto es preciso que las palabras *al-islam* y *al-'arab* permuten sus puestos, porque ahora toda la frase se ha tecleado en grafía árabe, y debe leerse, pues, de derecha a izquierda.



g

United States of اهلاً وسهلاً في
The

g'

The United States اهلاً وسهلاً في
of

h

States of America اهلاً وسهلاً في
The United

h'

The United States اهلاً وسهلاً في
of America

10. SALTO AUTOMATICO DE LINEA es la capacidad del ordenador para llevar una palabra hasta el comienzo de la línea siguiente de la pantalla de visualización si no cabe completamente en la línea en curso. Cuando en el texto han de combinarse varios idiomas que se escriban de derecha a izquierda unos, y en sentido contrario otros, se plantea un problema especial. Tenemos aquí *ahlan wa sahlan fi* (que significa, "bienvenido a ...") escrito en árabe. Los caracteres árabes aparecen en la pantalla en orden derecha-izquierda; un marcador (el circunflejo) va moviéndose hacia la izquierda para indicar dónde entrará el próximo carácter (*b*, *c*). El mecanógrafo pasa ahora a inglés, para escribir "The United States" (*d*, *e*, *f*). Ahora el circunflejo permanece estacionario; los caracteres pulsados van deslizándose hacia la izquierda, haciendo sitio a un nuevo texto. Este nuevo texto ("of America") exigiría un salto de línea, pero si el ordenador continúa empujando el texto hacia la izquierda, las palabras que saltarán serán "The United" (*g*, *h*), invirtiendo la lógica de las mitades del texto inglés. Una forma más adecuada de salto (*g'*, *h'*) hace bajar "of America" y el circunflejo a la línea siguiente.

'arab significan el islam y los árabes", donde al-islam y al-'arab están escritas en árabe [*véase, en la figura 8, este ejemplo en inglés y árabe*]. Supongamos que, en el curso de la corrección, la palabra española *y* se remplaza por su equivalente en árabe; las palabras árabes tendrán entonces que permutar sus lugares, porque ahora son parte de una frase enteramente expresada en árabe, que debe, por tanto, escribirse de derecha a izquierda. Empero, las palabras escritas en árabe no han sufrido corrección. De hecho, el texto almacenado en el ordenador cambia tan sólo para acomodar la sustitución de la palabra *y*. La transposición visible de las palabras árabes es por completo consecuencia del proceso de presentación del texto.

La codificación, el dactilografiado y la presentación del texto son elementos fundamentales del procesamiento de texto plurilingüe; pero las dificultades que es preciso arrostrar al proyectar un sistema de tratamiento de textos políglota no terminan ahí. Imaginemos que las oficinas de una compañía de Texas se incorporan a una red internacional de tratamiento de textos. Desde el Oriente Medio llega hasta ellas, electrónicamente, un documento en árabe. Supongamos, sin embargo, que los ordenadores de Texas no dispongan de los programas necesarios para la presentación de textos en árabe. Deberán, a pesar de ello, manejar el texto lo mejor que puedan, sin "estrellarse" ni interpretar erróneamente como ingleses los códigos de árabe. Deben, además, presentar cuando menos las porciones en inglés de los textos plurilingües. Los ordenadores de Texas, por otra parte, deberían ser capaces de admitir un módulo de programas para árabe que añadiera las instrucciones de restitución del árabe al repertorio de las que ya tienen.

El caso planteado por la multinacional petrolera sugiere ya cuáles han de ser los objetivos del diseño a gran escala de sistemas políglotas de tratamiento de textos. Son éstos: compatibilidad (todos los ordenadores del sistema han de poder intercambiarse documentos redactados en cualquier mezcla de grafías), apertura (cada ordenador ha de poder operar sensatamente con grafías que le sean desconocidas) y modularidad (ha de admitir la adición, una por una, de las capacidades de manipulación de nuevos lenguajes). Tales objetivos son difíciles, pero alcanzables. Las soluciones se deducirán en gran medida del tratamiento del texto por métodos suficientemente amplios para dar cabida a cualquier combinación de lenguas vivas del mundo.

Las primeras aplicaciones del tratamiento plurilingüe de textos residirán seguramente en la confección de documentos plurilingües. Después de todo, al desarrollarse la política y el comercio a escala mundial, resultan esenciales toda clase de documentos plurilingües. Es seguro, además, que los programas capaces de manipular textos en varios idiomas ayudarán y beneficiarán a traductores y profesores de idiomas. La traducción automática de documentos de unas a otras lenguas es meta mucho más lejana. Más aún, por el momento no hay razones para imaginar que pueda conseguirse una máquina traductora de elevada calidad. La traducción fiel de un pasaje exige que el traductor comprenda el pasaje, tanto en su contenido explícito como por las connotaciones que en él van implícitas. Un cuarto de siglo de intensa investigación no ha logrado avances significativos que permitan dotar de tal capacidad a los ordenadores. Ya son realidad las traducciones de baja calidad en campos bien concretos (manuales de instrucciones, por ejemplo); pero incluso en tales casos, el éxito de la traducción depende mucho de su corrección por un lector de pruebas humano.

Las discutibles expectativas que puedan tenerse acerca de máquinas traductoras de elevada calidad queda compensadas, me parece, por las brillantes perspectivas que ofrece la correspondencia electrónica, la transmisión casi instantánea de documentos o mensajes a través de redes electrónicas particulares o de los servicios públicos de comunicaciones. Ya son de uso cotidiano sistemas internacionales de correspondencia electrónica. Se asemejan a los sistemas telefónico y postal en que su utilidad crece conforme aumenta la amplitud de la red. Parece, por consiguiente, inevitable que los servicios de correspondencia electrónica acaben por expandirse y fusionarse, hasta formar una sola organización de servicio postal electrónico a escala mundial. Para que tal pueda darse, hay un prerequisito inevitable. El teléfono no exige de sus usuarios que hablen determinado idioma, ni tampoco lo exige el sistema postal. Pero ningún sistema de correo electrónico podrá tener éxito como medio de comunicación mundial mientras los textos que transmita no puedan ser plenamente plurilingües. En mi opinión, tal sería la aplicación decisiva que tuviera el tratamiento de textos plurilingües.

Matemática de las variedades tridimensionales

El estudio topológico de estas generalizaciones de las superficies de dimensiones superiores sugiere que el universo podría estar retorcido cual lazo de cuerda enredado. Podemos ya analizar geométricamente la mayoría de las variedades

William P. Thurston y Jeffrey R. Weeks

Hace miles de años mucha gente creía que la Tierra era plana. Que así fuera debió parecer evidente a cualquiera que mirase el mar o una gran llanura; y se razonaba, no sin cierta lógica, que la superficie de la Tierra había de ser infinita o tener un borde. Ahora se comprende, por supuesto, cómo pudo surgir un error tan básico: incluso desde unos pocos miles de metros por encima del terreno una pequeña parte de nuestro aproximadamente esférico planeta parece una pequeña parte de un plano. Lo que no se aprecia tan fácilmente es que un número ilimitado de diferentes formas de la Tierra daría lugar a las mismas observaciones locales. Por ejemplo, tales observaciones locales serían coherentes con el hecho de que la Tierra tuviera la forma de una pera o incluso de una rosquilla.

Las investigaciones en la rama de las matemáticas llamada topología ponen de manifiesto que nos enfrentamos ante una situación análoga cuando intentamos describir la forma global del universo basándonos en la mera observación desde el punto del espacio donde estamos. Un observador terrestre no puede sacar la conclusión de que el universo conserve la estructura geométrica del espacio euclídeo ordinario hasta distancias ilimitadas, aunque todavía no hay prueba alguna de lo contrario. Si la estructura del universo no es euclídea, ¿cuáles son las alternativas? Una idea familiar es que el universo puede estar "curvado" de una manera muy similar a como puede curvarse una superficie. La curvatura tridimensional del espacio y un concepto estrechamente relacionado, la curvatura tetradimensional del espacio-tiempo, se han convertido en ideas importantes en astronomía y cosmología gracias al papel clave que desempeñan en la teoría general de la relatividad de Einstein.

Sin embargo, la sola determinación de la curvatura no es suficiente para establecer lo que podría llamarse la forma del universo. Por analogía con las superficies bidimensionales puede describirse ciertos tipos de estructuras tridimensionales del universo, pero la analogía no hace más que insinuar la riqueza de forma que se introduce con la tercera dimensión. De hecho, como el espacio y el tiempo reciben en la teoría de la relatividad tratamiento de una sola entidad llamada espacio-tiempo, se podría suponer que la estructura matemática apropiada para el universo debe ser de dimensión 4. Hay buenas razones para creer, sin embargo, que la estructura del espacio-tiempo tetradimensional está regida por la estructura del espacio tridimensional. Por tanto, para investigar la estructura global del universo sin prejuicios hay que empezar por comprender las clases de estructuras tridimensionales que podrían dar lugar al universo observado. Las estructuras se llaman variedades tridimensionales o, para abreviar, trivariedades.

El estudio de las trivariedades es, en cierto sentido, una generalización del de las bivariedades o superficies. Desde hace más de un siglo, los topólogos saben cómo describir y clasificar todas las posibles bivariedades, pero la clasificación sistemática de todas las trivariedades sigue siendo un problema abierto, habida cuenta de la excesiva complejidad que algunas de ellas encierran. Un procedimiento matemático llamado cirugía sugiere una medida de esa complejidad. La cirugía posibilita la construcción de una trivariedad a partir de cualquier lazo de cuerda enredado, sin importar lo anudado o retorcido que esté el enredo. Imaginemos frente a frente dos masas enmarañadas de sedal de pescar y tratemos de determinar si están o no enredadas exactamente de la misma manera. Mientras no consigamos clasificar tales enredos de hilo de una manera sistemática no hay esperanza de que las trivariedades puedan analizarse. Hasta recientemente, por tanto, los matemáticos tenían pocas razones para pensar que se pudiera idear una teoría sistemática de las trivariedades.

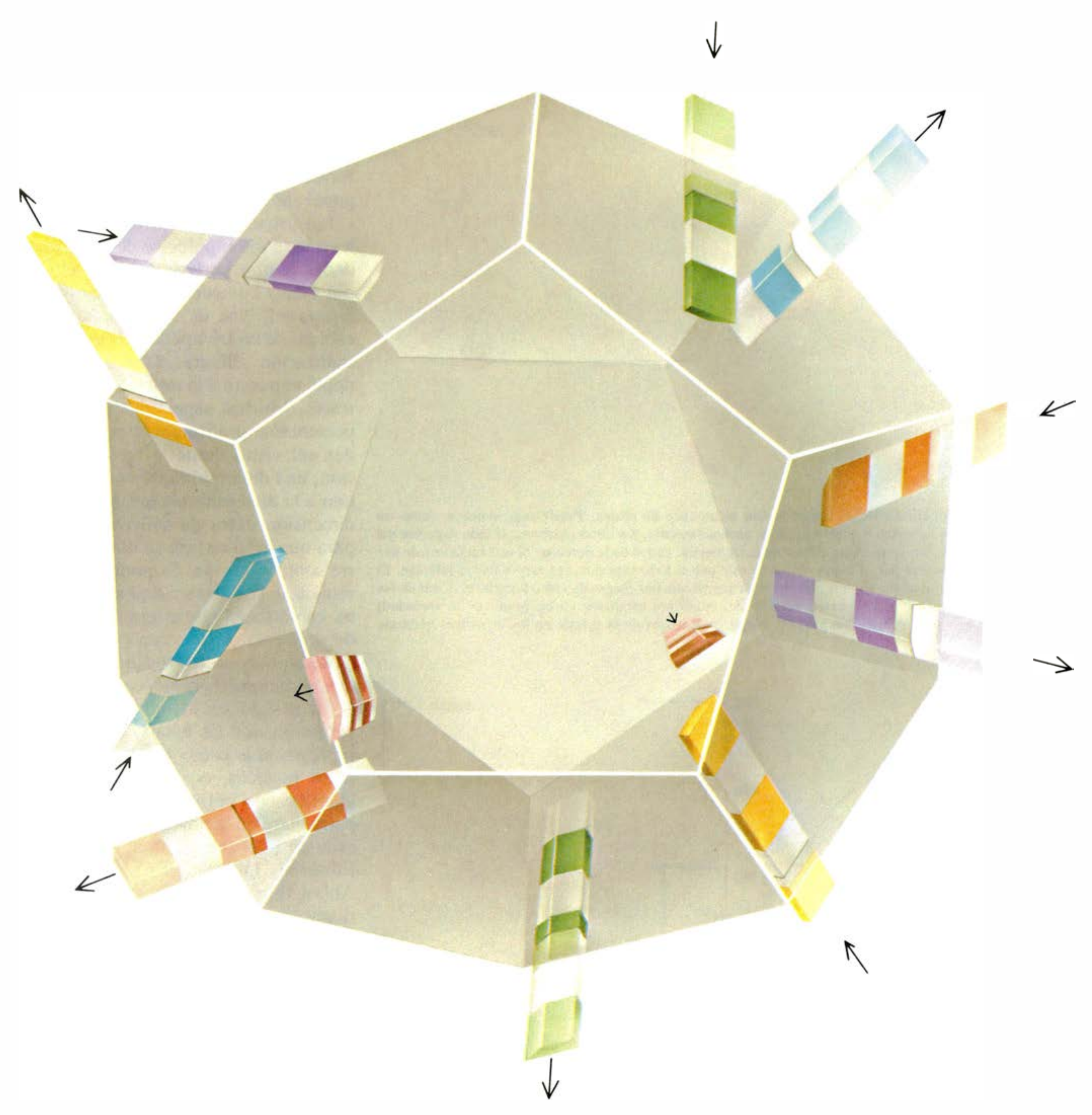
Esa afirmación pesimista debe ponerse ya en cuestión. Las investigaciones de uno de nosotros (Thurston) sobre la geometría de las trivariedades demuestran la existencia de un modelo que puede llevar a una comprensión de todas las posibles trivariedades. Todas las trivariedades conocidas se ajustan al modelo; y como resultado, sus retorcimientos y arrollamientos pueden ser descritos en términos geométricos.

La teoría de las variedades surgió, en el siglo XIX, de la necesidad de interpretar geométricamente algunas relaciones cuantitativas. Por ejemplo, el conjunto de las soluciones de una ecuación que tenga dos variables puede ser representado como un conjunto de puntos del plano. Cada punto representa un par de valores de las variables que hacen que se verifique la ecuación; típicamente, el conjunto de puntos es una curva o un conjunto de curvas. Análogamente, el conjunto de las soluciones de una ecuación con tres variables puede representarse a menudo como una superficie bidimensional en el espacio de tres dimensiones, tal como la superficie de una esfera. Para ecuaciones con más de tres variables se puede describir geométricamente el conjunto de las soluciones de manera muy similar: es una variedad de dimensión superior en un espacio de dimensión aún mayor. Aun-

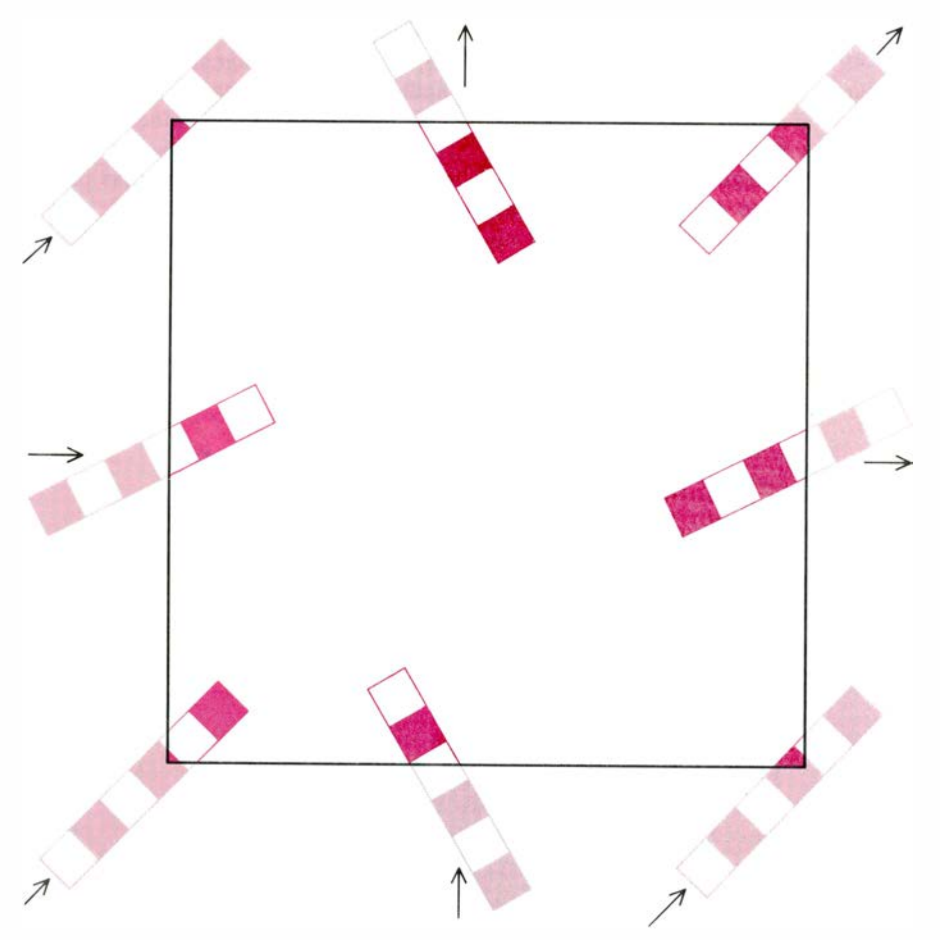
que no se puedan visualizar tales objetos directamente, los matemáticos han desarrollado herramientas conceptuales para el estudio de las ecuaciones que conducen a variedades de dimensión superior.

La topología, ciertamente, no resuelve ecuaciones. Lo que hace es proporcionar un vocabulario matemático –adjetivos y nombres– que permite que un conjunto de soluciones sea discutido de una manera general, sin que se especifiquen de hecho. Así, aunque la variedad de puntos que constituye el conjunto de soluciones de una ecuación tiene una forma precisa bien determinada, la topología de la variedad no está condicionada por las propiedades de esa forma particular. Por el contrario, la topología abarca cualquier propiedad que se conserve cuando la variedad se deforma de una manera arbitraria, siempre que la deformación se haga sin cortar, rasgar ni pegar unas partes con otras.

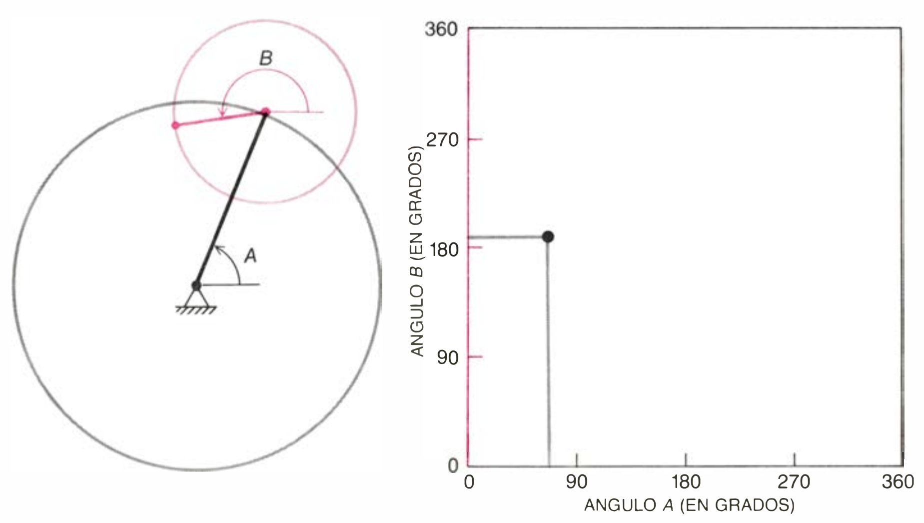
Podemos deformar una rosquilla hasta darle la forma de una taza de



1. ESTRUCTURA TOPOLOGICA del Universo. No tiene por qué conformarse necesariamente a la estructura del espacio euclídeo tridimensional infinito. La teoría matemática de las variedades tridimensionales, o trivariedades, induce a pensar que el espacio podría "curvarse sobre sí mismo" de infinidad de maneras diferentes. Un posible modelo para la topología del espacio es la variedad tridimensional descubierta en 1932 por Herbert Seifert y C. Weber. La variedad no puede dibujarse sin más porque, para hacerlo, habría que verla desde una dimensión superior. No obstante, puede representarse, en un sentido más limitado, como un dodecaedro cuyas caras opuestas han sido pegadas o identificadas matemáticamente de una manera determinada. Las reglas de colores que entran y salen de las caras del dodecaedro indican cómo han de hacerse los pegamientos: una cara de cada par se ajusta a la otra después de un giro de 3/10 de vuelta alrededor del eje perpendicular de ambas caras. Aunque partes de las barras aparecen, de una manera más difusa, en el exterior del dodecaedro, no hay tales barras allí porque se supone que sólo existen los puntos interiores del dodecaedro. Cuando una de las barras se mueve hacia una de las caras del dodecaedro, desaparece en esa cara y reaparece en la cara opuesta, como si estuviese entrando en el dodecaedro desde otra dirección. Si la estructura del universo fuera la de variedad de Seifert-Weber, el universo, aunque sería finito, se expandiría indefinidamente.



2. VARIEDAD BIDIMENSIONAL conocida con el nombre de bitoro. Puede representarse como un cuadrado cuyos lados opuestos han sido pegados abstractamente. En otras palabras, el lado superior del cuadrado se identifica con el inferior; el lado de la izquierda, con el de la derecha. Si una regla se sale por el lado derecho, reaparece por el izquierdo; si se sale por el lado superior, reaparece por el inferior. El movimiento es similar al de los objetos que van y vienen en muchos juegos de vídeo familiares. Cuando los lados se pegan en abstracto, los cuatro vértices del cuadrado coinciden en un punto de la variedad; cuando una regla se mueve hacia un vértice, reaparecen trozos de la misma en los otros tres vértices.

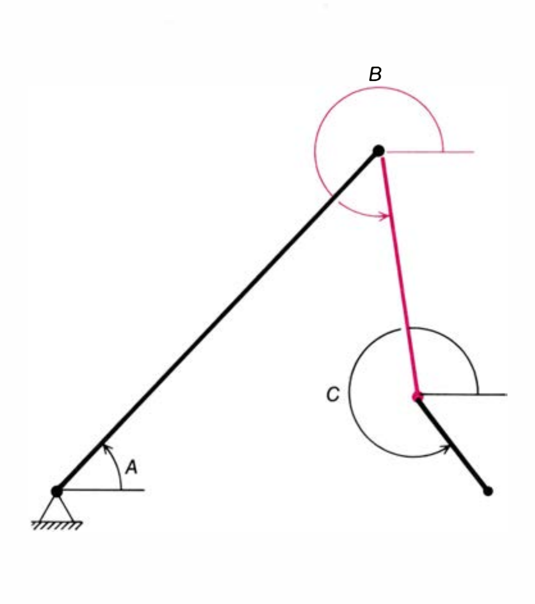


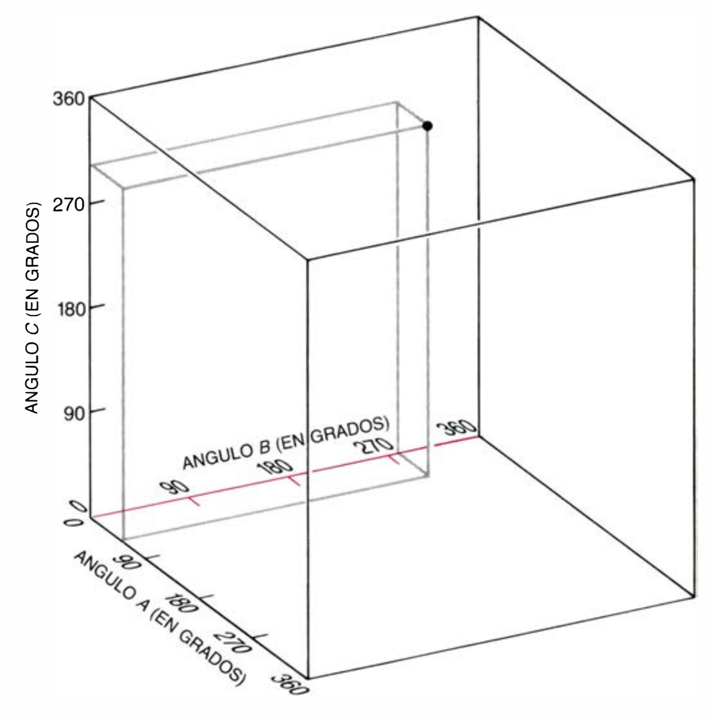
3. MECANISMO ARTICULADO DE DOBLE MANIVELA, constituido por dos barras rígidas sujetas por un punto. El extremo de una de las barras se mantiene fijo. Las barras giran alrededor de los puntos de sujeción, siempre que el movimiento no se salga del plano de la página (*izquierda*). Cualquier configuración permitida de las barras puede representarse por un punto en un sistema de dos ejes coordenados perpendiculares: un eje da el ángulo entre la dirección de la primera barra y una dirección fija, y el segundo eje da el ángulo correspondiente para la segunda barra. El conjunto de todos los puntos así obtenidos, que representa todas las posiciones posibles del mecanismo, se llama espacio de configuraciones del mecanismo articulado (*derecha*). Como la configuración de la doble manivela no cambia si el ángulo de cualquier barra varía en 360 grados, el espacio de configuraciones es un cuadrado acotado por las rectas que representan las rotaciones de 0 y 360 grados de cada barra. Los puntos de lados opuestos del cuadrado representan configuraciones idénticas del mecanismo; el espacio es un bitoro.

café, hundiendo una depresión cóncava en la superficie de la rosquilla y después agrandando la depresión al tiempo que se encoge el resto. Como dice el viejo chiste, un topólogo es una persona que no sabe distinguir una rosquilla (de un agujero) de una taza de café (con un asa). Por otra parte, el topólogo sí que distingue la superficie de una rosquilla de la de un vaso sin asas, porque no hay modo de deformar de manera continua una en la otra. Puede parecer que, permitiendo deformaciones arbitrarias, la topología descarta la mayoría de las características interesantes de una variedad. En muchas cuestiones matemáticas, sin embargo, la información topológica desempeña un papel significativo.

Las primeras aportaciones sustanciales a la teoría topológica de las trivariedades fueron hechas al doblar el siglo por Henri Poincaré, Max Dehn y Poul Heegaard. Una de las dificultades del estudio de las trivariedades es que la visualización directa debe, en parte, dejar su puesto a la representación abstracta. Muchas superficies pueden representarse gráficamente porque pueden ser vistas desde la tercera dimensión, una dimensión que es superior en uno a la dimensión de la superficie. La dimensión extra da suficiente espacio para que la superficie se doble y se cierre sobre sí misma. Se podría tratar de visualizar una trivariedad externamente, como si se la estuviera contemplando desde un espacio con cuatro o más dimensiones, pero resulta que tales complicaciones son innecesarias.

En el siglo XIX los matemáticos descubrieron que las bivariedades podían representarse como polígonos con los lados pegados, o, en otras palabras, identificados entre sí de una manera particular. En la novela *Flatland*, publicada en 1884 (en español, *Planilandia*, Editorial Labor, 1976), Edwin A. Abbot describe una criatura bidimensional que vive dentro del plano. Considérese el movimiento de tal ser en una bivariedad que tenga una topología más exótica; por ejemplo, un cuadrado con los lados opuestos identificados. Cuando la criatura se sale por el lado superior del cuadrado, reaparece por el inferior; cuando se sale por el lado derecho, reaparece por el izquierdo. Intrínsecamente, por tanto, el lado superior del cuadrado está pegado con el inferior y el derecho pegado con el izquierdo. Es de observar que muchos juegos de vídeo funcionan con el mismo principio: cuando una figura se sale por el lado superior de la pantalla, reaparece por el inferior.





4. UNA TRIVARIEDAD análoga al bitoro se obtiene del conjunto de todas las posibles configuraciones de una triple manivela cuyo movimiento estuviera confinado a un plano (*izquierda*). Si los ángulos que forma cada barra con una dirección fija se representan en un sistema de tres ejes mutuamente perpendiculares, cada posición posible de la triple manivela se ilustrará como un punto de cubo (*derecha*). La configuración del mecanismo no cambia con una rotación completa de cualquiera de las barras. Por tanto, en el espacio de configuraciones cada cara del cubo que corresponda a una rotación de 360 grados se considerará identificada con su cara opuesta, que corresponderá a una rotación de cero grados. La trivariedad resultante se llama tritoro.

Para un cuadrado es cosa fácil realizar estos pegamientos. Uniendo el lado superior del cuadrado con el inferior se obtiene un cilindro abierto por ambos extremos, y pegando los extremos abiertos queda una rosquilla de un agujero. Después de pegar los lados se borran las costuras; el habitante de Planilandia no puede decir dónde se han hecho los pegamientos. La rosquilla y el cuadrdo (con los lados así identificados) se consideran, desde el punto de vista topológico, la misma variedad abstracta: el bitoro.

Sin embargo, como ponen de manifiesto los juegos de vídeo, no es necesario hacer el pegamiento para entender intuitivamente el bitoro. Con un poco de práctica resulta igualmente fácil seguir el movimiento de un objeto en un cuadrado donde los pegamientos están descritos sólo en abstracto. Los pegamientos abstractos traen al ámbito de la intuición geométrica gran cantidad de variedades que, en otro caso, resultaría difícil de representar. Lo importante para nosotros es que el truco de los pegamientos puede generalizarse fácilmente para aplicar la intuición geométrica a la comprensión de las trivariedades.

Considérese la trivariedad generada a partir de un bloque rectangular de espacio; verbigracia, el espacio interior de una habitación. Péguese, en abstracto, la pared delantera de la habitación con la trasera, la pared de la derecha con la de la izquierda y el suelo con el techo. Si los pegamientos se hicieran realmente, tendría uno que imaginarse la habitación doblándose y uniéndose consigo misma en una cuarta dimensión. Sin embargo, todo cuanto necesitamos para describir la variedad está dado por el procedimiento de los pegamientos abstractos. Si un objeto dentro de la variedad se mueve hacia la pared delantera, desaparece en esa pared para reaparecer en la trasera; análogamente, el objeto desaparece por la pared de la derecha al mismo tiempo que reaparece por la de la izquierda y reaparece por el suelo conforme desaparece por el techo. Evidentemente, el movimiento guarda una estrecha semejanza con el de un objeto en el bitoro; la variedad es la análoga en dimensión tres del bitoro; por eso se llama el tritoro.

Dejemos de lado momentáneamente los conceptos ordinarios de espacio y realidad física, e imaginémonos viviendo en un tritoro. Si mira hacia la pared trasera, la línea de visión atraviesa esta pared y regresa desde el punto opuesto en la pared delantera. Lo que se ve es una imagen de uno mismo observado desde atrás. Mire hacia la derecha y verá la imagen de su perfil izquierdo; mire hacia el suelo y verá la parte superior de su cabeza. En realidad, como la línea de visión continúa cruzando la habitación en todas direcciones, ve lo que parece ser una infinidad de imágenes suyas y de la habitación, todo dispuesto en un retículo rectangular. El efecto óptico recuerda al creado por una habitación cuyas paredes, suelo y techo estén cubiertos de espejos. Con una diferencia: no hay reflexiones que inviertan las imágenes de la habitación; antes bien, todas las imágenes son copias directas del original.

Porque los astrónomos no hayan observado tan peculiares efectos visuales, ¿habrá que deducir que el universo no pueda ser un tritoro? En absoluto. El universo tiene una edad comprendida entre 10.000 y 20.000 millones de años. Si fuera un tritoro, de 60.000 millones de años-luz por ejemplo, ninguna luz habría tenido tiempo de terminar una vuelta. Cabe también que la astronomía observacional haya detectado ya luz que hubiera dado la vuelta al universo: si el universo es un tritoro, alguna de las galaxias distantes que observamos pudiera ser la nuestra. Conjetura esta difícil de comprobar porque la imagen de nuestra galaxia estaría formada con luz que habría dejado su fuente hace miles de millones de años y pasado el tiempo que media cruzando el universo. Lo que se podría ver, suponiendo una resolución de imagen ilimitada, sería la Vía Láctea en sus estadios primitivos de evolución, con el aspecto

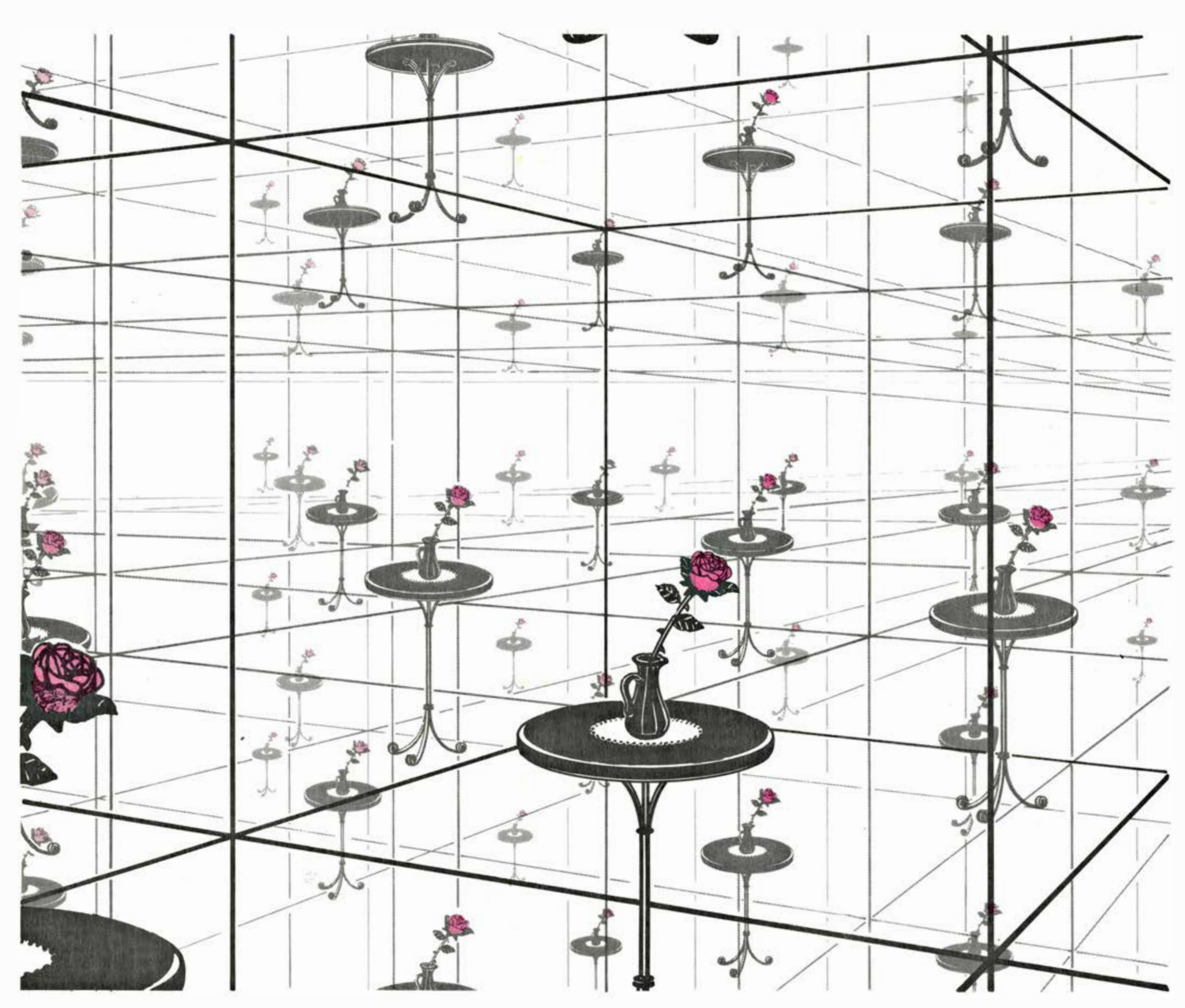
que tenía cuando se emitió la luz. Tal universo, de volumen finito, carece de frontera.

De otros poliedros, amén del propio cubo, se deducen modelos semejantes de la posible estructura espacial del universo. Dos de tales variedades se construyen fácilmente a partir del dodecaedro regular. Las doce caras del dodecaedro son pentágonos regulares dispuestos a pares, de tal manera que los miembros de cada par son paralelos y diametralmente opuestos.

En la primera trivariedad dodecaédrica, un elemento de cada par de pentágonos se identifica con el pentágono opuesto girando el primero 36 grados (1/10 de vuelta) en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del eje perpendicular a su superficie. La variedad así obtenida recibe el nombre de variedad de Poincaré, por ser equivalente a una trivariedad descubierta por este matemático francés en 1902 (aunque Poincaré ignoraba que la variedad pudiera obtenerse a partir del dodecaedro). La segunda variedad dodecaédrica surge cuando cada pentágono se pega con su opuesto, después de una rotación de 108 grados (3/10 de vuelta) en sentido contrario a las agujas del reloj. La variedad resultante se llama espacio dodecaédrico de Seifert-Weber, en honor de Herbert Seifert y C. Weber, ahora en la Universidad de Ginebra, quienes la descubrieron en 1932 [*véase la figura 1*]. Como el tritoro, ambas variedades darían lugar a un universo con un volumen finito, pero sin borde ni frontera.

De manera similar se puede construir un gran número de otros modelos de estructura en gran escala del universo. Por ser irregulares la mayoría de los poliedros, la mayoría de las trivariedades se obtienen por pegamientos abstractos de las caras de poliedros irregulares. La descripción del pegamiento puede llegar a complicarse mucho cuando el número de caras es grande.

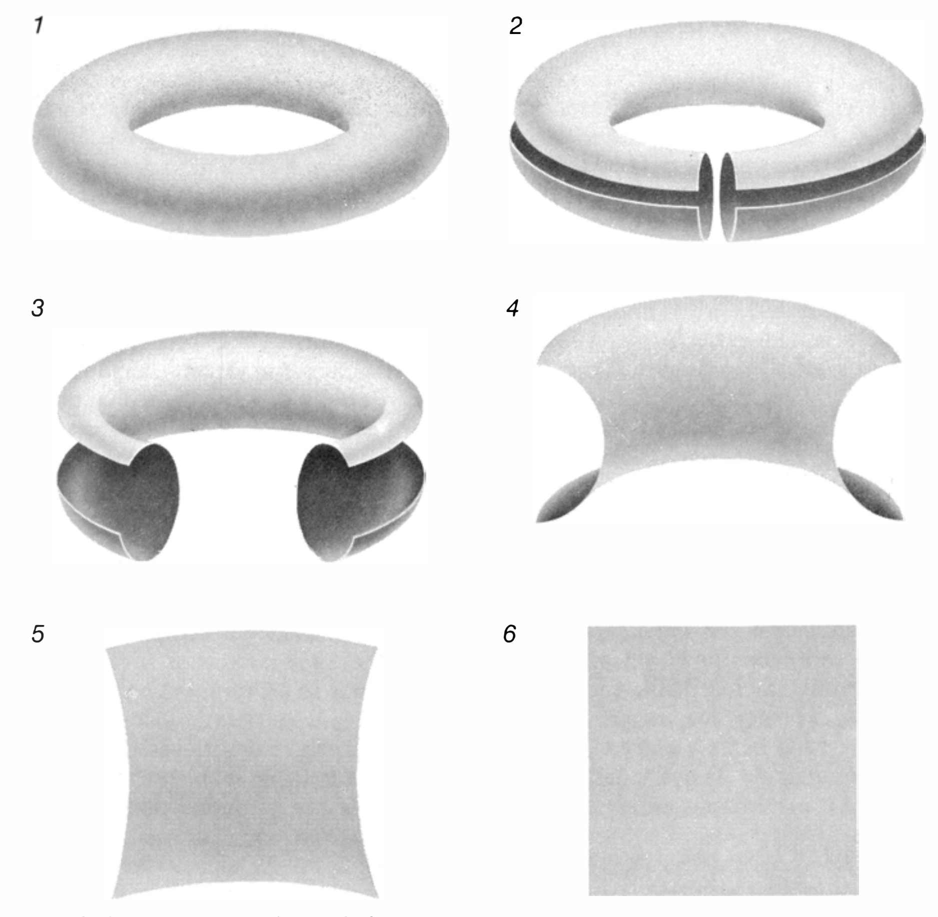
Puede parecer que nos movemos entre lucubraciones ilusorias. El profano quizás aceptara que la verdadera topología del espacio es algo sobre lo que vale la pena especular, pero seguramente no sabría hasta qué extremo podría llevarse tal especulación. En particular, el no especialista podría cuestionarse la utilidad de estudiar "espacios" en plural. Para el topólogo tales objeciones no tienen mucho sentido, porque se fijan sólo en el contenido meta-



5. PANORAMA del que dispondría un observador en el interior de un tritoro. Es similar al del interior de una habitación cuyas paredes, suelo y techo estuvieran cubiertos de espejos; no hay, sin embargo, inversión de imágenes. La línea de visión atraviesa la pared de la derecha y emerge por la de la izquierda; mirando hacia la derecha, el observador verá la habitación tal como se contemplaría desde la pared de la izquierda. Mirando hacia adelante el observador verá la habitación con el aspecto que tendría desde la pared trasera, y mirando hacia arriba la observará tal como se vería desde el suelo. Como la línea de visión continúa atravesando indefinidamente el tritoro, la habitación aparecería como un retículo rectangular infinito extendiéndose en todas direcciones. Pero el tritoro no es infinito, porque las imágenes de esa formación rectangular infinita resultan ser imágenes de la misma cosa.

fórico de la topología. El estudio de la topología puede estar ciertamente motivado por problemas surgidos en otros contextos, pero la topología en sí es una teoría de la forma pura, no una teoría del mundo real. Si mañana se estableciese la estructura del espacio, ningún topólogo abandonaría el estudio de los espacios abstractos.

Esta afirmación no implica necesariamente que la topología no tenga nada que ver con el mundo real. Por el contrario, como otras ramas de las matemáticas, la topología traba muchas conexiones con el mundo, tan firmes cuan importantes, pero son conexiones indirectas. Si una hipótesis particular, como la espacial, empieza a perder fuerza, es mejor abandonar la hipótesis que abandonar el estudio de la forma a la que dio lugar. La experiencia ha demostrado en repetidas ocasiones que una teoría matemática dotada de una rica estructura interna con frecuencia resulta tener consecuencias significativas para la comprensión del mundo real, muchas veces de una manera que nadie podría haber sospechado antes de que se desarrollase la teoría. Una teoría nunca alcanzaría el maduro estado de desarrollo en el que tales aplicaciones se reconocen si fuera constantemente gravada con hipótesis excesivamente elaboradas.



6. ROSQUILLA DE UN AGUJERO abierta y estirada hasta formar un cuadrado. Si los lados opuestos del cuadrado se pegan en abstracto, la superficie que resulta es, desde un punto de vista topológico, equivalente a la rosquilla. Por ser llano el cuadrado, como el plano, su geometría es euclídea; por tanto, desde el punto de vista topológico se dice que la rosquilla de un agujero admite una geometría euclídea.

Con el fin de ilustrar el alcance del análisis topológico, será útil abandonar por el momento la hipótesis cosmológica en favor de otra más terrestre. Consideremos un sistema mecánico de barras articuladas, así el que conecta una tecla de una máquina de escribir mecánica con el elemento de escritura. Sólo estudiaremos mecanismos articulados planos, o en otras palabras, juegos de barras rígidas sujetas una a otra de tal manera que todas se muevan en un único plano. Debe haber también un punto de anclaje, o base fija, al que se sujeten las barras.

Toda teoría de mecanismos articulados se propone analizar los posibles movimientos de éstos. Hay muchos artilugios mecánicos a los que se aplica este análisis; no tienen necesariamente que guardar un estrecho parecido físico con un conjunto de barras articuladas. El estudio de estos mecanismos estuvo muy en boga en la segunda mitad del siglo XIX, cuando se asistía a un fuerte interés por la búsqueda de un mecanismo articulado en que un punto al menos se moviera en línea recta. Presumíase que una solución al problema tendría muchas aplicaciones prácticas, tales como el diseño de un tren de fuerza para una locomotora de vapor. Aunque se encontró cierto número de elegantes soluciones teóricas, ninguna de ellas aportó un diseño práctico desde el punto de vista mecánico.

Un mecanismo articulado puede representarse matemáticamente como un conjunto de segmentos rectilíneos en el plano; en algunas de las intersecciones de las rectas puede haber pivotes o espigas para la articulación. En la teoría matemática se supone que los segmentos y los pivotes unos pasan libremente a través de otros. El problema de construir un modelo físico cuyas barras y articulaciones reproduzcan los movimientos del mecanismo idealizado no es trivial, pero es secundario para el análisis matemático. Para cualquier versión matemática de un mecanismo articulado existe un mecanismo físico que realiza el mismo movimiento, aunque este último puede ser mucho más complicado que su contrapartida teórica y tener un aspecto completamente diferente.

El conjunto de todas las posibles posiciones de uno de estos mecanismos se llama espacio de configuraciones del mecanismo articulado; en la mayoría de los casos es una variedad topológica. Considérese el mecanismo más sencillo posible, constituido por una única barra sujeta por un extremo, pero por lo demás libre para moverse en el plano. El extremo móvil de la barra traza una circunferencia en el espacio; cada punto de la circunferencia corresponde a una única posición del mecanismo. El espacio de configuraciones es una circunferencia, que también puede considerarse un segmento rectilíneo con los extremos pegados idealmente. La circunferencia es una variedad unidimensional análoga al bitoro; cada punto de la variedad se identifica con una posición del mecanismo.

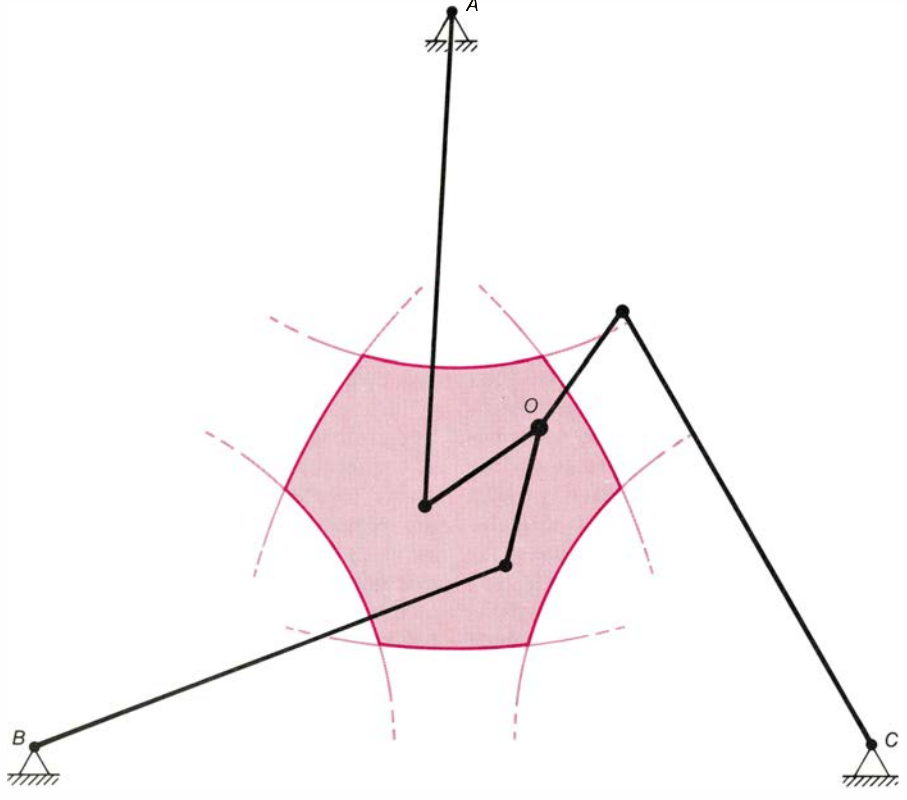
Fijando otra barra al extremo de la primera se obtiene una "doble manivela", un mecanismo articulado con dos grados de libertad. Si la segunda barra es más corta que la primera, el extremo libre de la segunda puede alcanzar cualquier punto de un anillo centrado en el punto de anclaje. El anillo está acotado exteriormente por una circunferencia cuyo radio es la suma de las longitudes de las dos barras e interiormente por una circunferencia cuyo radio es la diferencia entre las dos longitudes. Si la segunda barra es de la misma longitud que la primera, el extremo libre de la segunda puede alcan-

zar cualquier punto de una circunferencia de radio igual a la suma de las longitudes de las dos barras. Si la segunda barra es más larga que la primera, el extremo libre describe también un anillo cuyo radio interior es igual a la diferencia entre las dos longitudes. No se debe confundir estos conjuntos de puntos con el espacio de configuraciones del mecanismo. La razón es que el conocimiento de la posición del extremo de la segunda barra no determina de manera única la configuración del mecanismo. Para cada punto alcanzado por el extremo libre de la segunda barra, el codo de la doble manivela puede estar doblado de dos modos diferentes.

Para analizar el espacio de configuraciones correctamente, es más fácil considerar las posiciones posibles de la doble manivela con independencia de dónde se encuentre el extremo libre. Cada configuración puede ser descrita por un par de ángulos, a saber, el ángulo entre cada barra y alguna dirección fija (por ejemplo, la que señala hacia la derecha), medida en sentido contrario a las agujas del reloj. Los dos ángulos varían libremente de cero a 360 grados; mas, para cada barra, el ángulo de cero grados se identifica con el de 360 grados. Si se representa gráficamente los dos ángulos en un sistema de ejes coordenados perpendiculares en el plano, cada punto del cuadrado limitado por las rectas correspondientes a cero y 360 grados de cada ángulo pertenece a una configuración diferente de la doble manivela. Además, cada configuración de la doble manivela está representada por un punto del cuadrado. Como cero y 360 grados están identificados, el lado superior del cuadrado se identifica con el inferior y el de la izquierda con el de la derecha. El espacio de configuraciones es el bitoro.

Si se añade una tercera barra al extremo libre de la doble manivela, cualquier posición de la triple manivela resultante puede describirse dando los tres ángulos de las barras. Los ángulos se miden de nuevo en sentido contrario a las agujas del reloj a partir de una dirección fija; varían libre e independientemente de cero a 360 grados. Como antes, los ángulos de cero y 360 grados se consideran identificados. Cuando los tres ángulos se representan en un sistema de tres ejes coordenados mutuamente perpendiculares, cada posición posible de la triple manivela queda representada por un único punto de un cubo en el que cada cara está pegada con su opuesta. El espacio de configuraciones de la triple manivela es, por tanto, equivalente al tritoro.

Todos los espacios de configuraciones que hemos descrito hasta ahora conducen a polígonos o poliedros cuyos lados o caras pueden pegarse sin necesidad de distorsionarlos. Sin embargo, no hay ley topológica que prohíba los pegamientos cuando los lados o las superficies no son congruentes geométricamente. La verdad es que los ejemplos que hemos dado son muy especiales: los pegamientos no requieren distorsión de ninguna de las partes para adosarlas. Considérese un mecanismo articulado constituido por tres dobles manivelas, cada una fijada por un extremo a un vértice de un triángulo equilátero y sujeta por su extremo móvil a los extremos móviles de las otras dos [*véase la figura 7*]. Con el fin de comprender el espacio de configuraciones del mecanismo, representemos primero el conjunto de todas las posiciones posibles del pivote central. Cada doble manivela mantiene el pivote o articulación central dentro de un anillo centrado en el punto de sujeción (de esa doble manivela). Por tanto, el pivote central alcanzará cualquier punto que esté en la intersección de los tres anillos correspondientes a las tres dobles manivelas. Esta intersección es un hexágono curvilíneo en el plano.

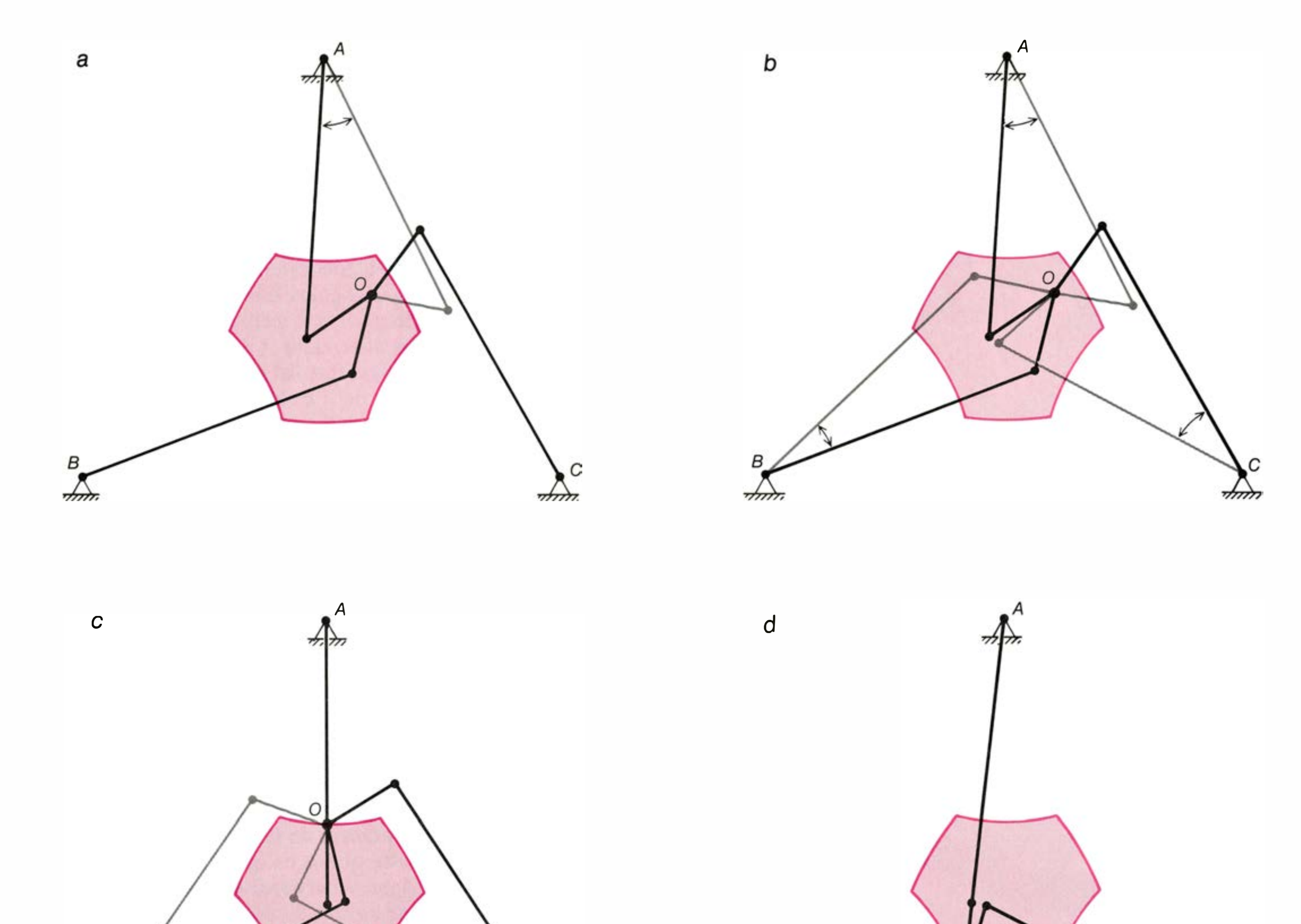


7. MECANISMO ARTICULADO de tres dobles manivelas unidas por una articulación central; engendra una bivariedad. El pivote central alcanza cualquier punto del interior del hexágono (*color*).

Sin embargo, para describir el espacio de configuraciones hace falta algo más que ese hexágono plano. Recuérdese que para una doble manivela hay dos configuraciones del mecanismo para cada punto alcanzado por el extremo de la segunda barra. Análogamente, para cada punto del interior del hexágono plano, el codo de cada doble manivela puede estar doblado de dos maneras diferentes. Con tres dobles manivelas, el número total de configuraciones para cada punto del interior del hexágono plano es de 2^3; hay, pues, ocho configuraciones. El espacio de configuraciones para las tres dobles manivelas puede, por tanto, construirse pegando en abstracto los lados de ocho hexágonos curvilíneos abstractos.

¿Cómo han de pegarse los ocho hexágonos abstractos en el espacio de configuraciones? Cuando la articulación central de las tres dobles manivelas yace sobre uno de los lados del hexágono plano, necesariamente alguna de las dobles manivelas tiene sus barras diferentes: las barras de la doble manivela pueden apuntar en la misma dirección o en direcciones opuestas. Sin embargo, en ambos casos, la configuración de todo el mecanismo queda determinada en cuanto se conoce la posición del pivote central y el sentido en que se doblan las dos dobles manivelas cuyas barras no están alineadas.

Por cada uno de los dos lados del he-



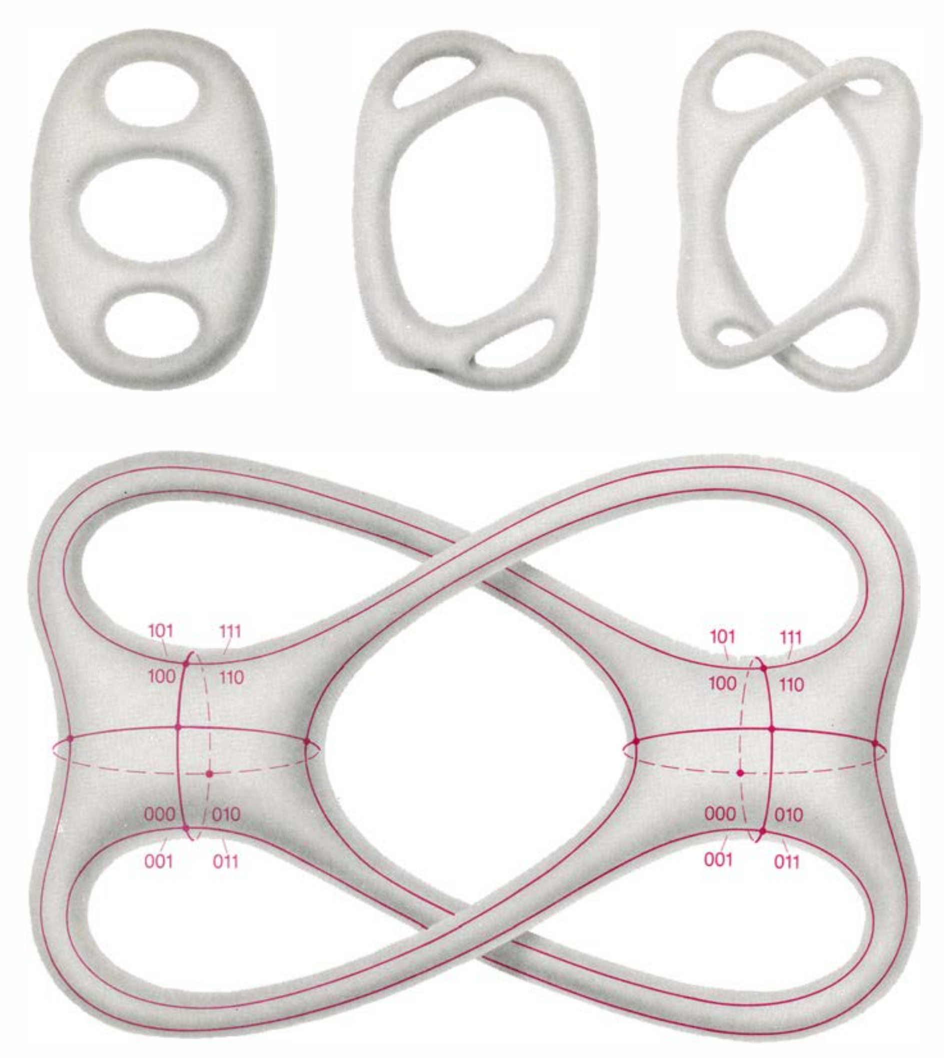
8. ESPACIO DE CONFIGURACIONES de las tres dobles manivelas: es una bivariedad en la cual puntos distintos representan diferentes configuraciones, o disposiciones posibles del mecanismo. Para que el pivote central alcance uno cualquiera de los puntos interiores del hexágono curvilíneo, cada una de las dos dobles manivelas puede estar doblada de dos maneras diferentes (*a*). La manera de doblarse de cada doble manivela es independiente del modo en que lo logran las otras, y así cada punto del interior del hexágono da lugar a $2^3 = 8$ configuraciones del mecanismo (*b*). Cada vez que el pivote central alcanza un lado del hexágono, sólo dos dobles manivelas pueden estar dobladas; el mecanismo sólo puede adoptar cuatro configuraciones (*c*). Cuando el pivote central llega a un vértice del hexágono, sólo una de las dobles manivelas puede estar doblada; el mecanismo únicamente adoptaría dos configuraciones (*d*).

xágono plano que se pueden trazar cuando la primera doble manivela está en línea recta, corresponden sólo 2^2, esto es, 4 lados distintos en el espacio de configuraciones, en vez de ocho. En el espacio de configuraciones se pegan dos hexágonos a lo largo de cada uno de dichos lados. Los dos hexágonos representan las dos formas en las que se puede doblar la primera doble manivela. El lado opuesto del primero de estos dos hexágonos también se pega al lado opuesto del segundo hexágono en el espacio de configuraciones, porque la primera doble manivela también está en línea recta en ese lado. La manera de doblarse de las otras dos dobles manivelas no cambia del primero al segundo hexágono. El análisis es idéntico para los otros lados del espacio de configuraciones.

De modo similar, cuando el pivote central de las tres dobles manivelas está en un vértice del hexágono plano, dos de las dobles manivelas tienen necesariamente sus barras en línea recta. En consecuencia, en el espacio de configuraciones sólo hay dos puntos, en lugar de ocho, que correspondan a cada vértice del hexágono plano, uno por cada manera en que puede doblarse la tercera doble manivela. Los cuatro hexágonos abstractos que corresponden a las cuatro formas en que se pueden doblar las dos dobles manivelas (que ahora están formando sendas líneas rectas) cuando el pivote central se mueve dentro del hexágono plano deben compartir un vértice en el espacio de configuraciones.

El espacio de configuraciones es una superficie que, a diferencia del hexágono plano, no tiene esquinas ni borde. La superficie puede ser embaldosada, o recubierta, con seis hexágonos. Hay $6 \times 2^2 = 24$ líneas entre las baldosas y $6 \times 2 = 12$ vértices, en cada uno de los cuales concurren cuatro baldosas.

La descripción del espacio de configuraciones para las tres dobles manivelas que acabamos de dar es lógicamente completa, ya que se han especificado todos los pegamientos abstrac-



9. OCHO HEXAGONOS ABSTRACTOS constituyen el espacio de configuraciones de las tres dobles manivelas; cada hexágono corresponde a una de las ocho maneras en que pueden doblarse las tres dobles manivelas para alcanzar uno de los puntos del hexágono curvilíneo. Si el codo de una doble manivela se dobla en el sentido de las agujas del reloj, se le asigna un 0 a su configuración; un 1, si se dobla en sentido contrario. A los hexágonos abstractos se les asignan tres dígitos binarios. Para representar los ocho hexágonos con las relaciones que han de tener en el espacio de configuraciones, deben ser situados sobre la superficie de una rosquilla de tres agujeros y deformados como si estuvieran hechos de goma. La rosquilla de tres agujeros se ha deformado en la variedad topológicamente equivalente de la parte inferior de la ilustración, para mostrar los ocho hexágonos de un modo más simétrico. Los dígitos binarios asignados a los hexágonos abstractos reflejan la norma con la que se hacen los pegamientos. Si los dígitos de dos hexágonos coinciden en dos de las tres posiciones, los hexágonos se pegan a lo largo de dos lados opuestos; los dos lados corresponden a los lados del hexágono curvilíneo en que la doble manivela asociada al dígito binario que no coincide está en línea recta. Cuatro hexágonos cualesquiera que coincidan en un dígito binario comparten un vértice del espacio de configuraciones. Los vértices diametralmente opuestos de los cuatro hexágonos coinciden en un segundo punto. Ambos puntos representan configuraciones en línea recta de las dos dobles manivelas correspondientes a las posiciones de los dos dígitos que no coinciden.

tos. No obstante, es mucho más satisfactorio realizar los pegamientos y mostrar la variedad como una superficie cerrada en el espacio. Resulta que tal construcción es posible, siempre que la descripción de los pegamientos dé lugar a una variedad que cumpla una condición técnica llamada orientabilidad. La variedad que hemos descrito es orientable y por tanto el pegamiento puede hacerse, aunque no directamente.

Se demostró a mediados del siglo XIX que toda bivariedad orientable era topológicamente equivalente a la superficie de una rosquilla con cierto número de agujeros. Este número recibe el nombre de género de la superficie. Por ejemplo, la esfera es una superficie de género 0. El género de la superficie de una taza de café de un asa es 1. El género de la superficie de una galleta con agujeros depende del molde con que se hace.

Para cualquier superficie dividida, de forma arbitraria, en células poligonales, el número de caras poligonales menos el número de aristas más el número de vértices es una constante numérica que depende sólo de la superficie. Este número, dato que merece destacarse, es independiente de la forma en que se divida la superficie en células poligonales. Esta constante se llama número de Euler, en memoria del matemático suizo Leonhard Euler. El número de Euler de una superficie de género n es igual a $2\text{-}2n$. Como la superficie puede estar curvada en el espacio, los polígonos no han de ser necesariamente planos y sus lados pueden curvarse de manera casi arbitraria. Por ejemplo, una esfera puede dividirse en ocho triángulos conectando los polos norte y sur con cuatro puntos situados sobre el ecuador. Como una esfera no tiene agujeros, su género es 0, y su número de Euler debe ser $2 - (2 \times 0) = 2$. Se comprueba fácilmente que hay seis vértices y 12 aristas en la superficie, de manera que el número de Euler de las ocho regiones triangulares de la esfera es en efecto 2. Vale la pena observar que el número de caras, aristas y vértices del ejemplo es característico también del octaedro, el cual es topológicamente equivalente a la esfera.

Como el espacio de configuraciones de las tres dobles manivelas puede dividirse en ocho caras hexagonales, con 24 aristas y 12 vértices, el número de Euler del espacio de configuraciones debe ser $8-24+12 = -4$. El género n de la variedad puede calcularse poniendo el número de Euler -4 igual a $2\text{-}2n$. Resulta que n es igual a 3. Los ocho hexágonos del espacio de configuraciones de las tres dobles manivelas pueden ser dibujados, con las relaciones correctas de unos con otros, sobre una rosquilla de tres agujeros [*véase la figura 9*].

La representación visual de una variedad como la rosquilla de tres agujeros es satisfactoria porque es concreta, pero tiene también ciertas desventajas. Por ejemplo, muchas de las simetrías presentes en la descripción abstracta de la variedad deben abandonarse para poder representarla en el espacio ordinario. En la descripción abstracta del espacio de configuraciones de las tres dobles manivelas que dimos inicialmente, todos los hexágonos eran congruentes entre sí. Además, una rotación de 120 o 240 grados de cualquier hexágono lo dejaba invariante. Sin embargo, en la representación visual del espacio de configuraciones la mayor parte de la simetría abstracta se ha perdido. Sobre la rosquilla de tres agujeros, ni los hexágonos son congruentes unos con otros, ni tienen simetría rotacional: no se puede hacer una rotación de 120 o 240 grados de uno de ellos sin cambiar su forma.

Otro problema que plantea la rosquilla de tres agujeros es que las propieda-

des geométricas de su superficie varían de punto a punto: las propiedades de la superficie cerca del canto exterior difieren de las propiedades de la superficie en la proximidad de los agujeros. Hay que hacer hincapié en que las propiedades geométricas a que nos referimos son intrínsecas de la superficie. La geometría intrínseca puede determinarse por medio de medidas hechas sobre la propia superficie, sin referencia al espacio circundante donde se encuentra la superficie. Hay que distinguirla de la geometría extrínseca de la superficie, que describe cómo se dobla la superficie en el espacio. Por ejemplo, si doblamos una hoja plana de papel sin distorsionarla hasta formar un cilindro o un cono, cilindro y cono mostrarán la misma geometría intrínseca que la hoja plana, aunque sus geometrías extrínsecas difieran por completo.

El hecho de que una superficie parezca doblarse de una manera no uniforme cuando la observamos desde arriba no constituye, por tanto, ningún indicador fidedigno de su geometría intrínseca. ¿Cuál es la diferencia intrínseca entre las regiones interior y exterior de la superficie de la rosquilla? Imaginemos que se corta un pequeño trozo de la porción exterior convexa de la rosquilla y se aplasta sobre una mesa. El trozo se agrieta y abre conforme se le va aplastando, de modo muy parecido a como lo hace la corteza de una naranja. Del proceso inverso saben mucho los sastres, que recurren a él cuando han de formar una parte de una prenda que haya de adaptarse a una forma convexa, como el busto de un vestido. Se corta del tejido un trozo puntiagudo, llamado sisa, y se cosen los dos lados de la abertura que queda.

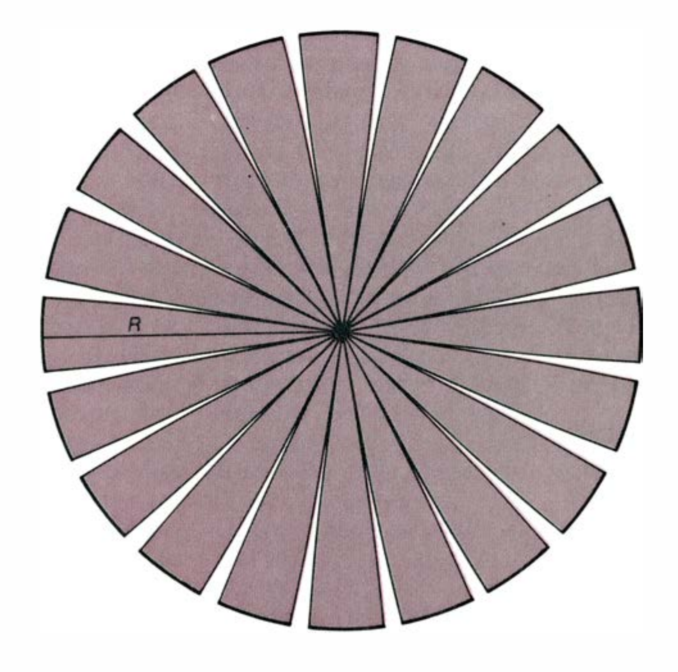
Cuando se corta un trozo pequeño de la superficie de la rosquilla próximo al agujero, al aplastarlo sobre una mesa, se arruga y se solapa consigo mismo. Un sastre puede invertir el proceso haciendo un corte en el tejido y cosiendo en el mismo un parche o remiendo puntiagudo. Este recurso se usa a menudo para hacer una falda que sea ajustada por debajo de las rodillas y con vuelo en la parte inferior. El que un trozo acabado de tela se rompa, se solape o se ajuste a una superficie plana cuando se extiende sobre ésta es una propiedad importante de su geometría intrínseca.

La geometría intrínseca de la superficie de una rosquilla de un agujero varía de manera muy parecida a la de una rosquilla de tres agujeros. Como hemos recalcado, la rosquilla de un agujero y el cuadrado cuyos lados opuestos han sido identificados tienen la misma topología. En el cuadrado, sin embargo, la geometría intrínseca es mucho más sencilla que en la rosquilla de un agujero: la geometría intrínseca en una región pequeña alrededor de cada punto del cuadrado es la misma que la de una pequeña región del plano. Esta propiedad se cumple incluso para los puntos de los lados y los vértices del cuadrado. En otras palabras, la geometría intrínseca de cualquier región pequeña del cuadrado con los lados opuestos identificados es la misma que la de cualquier otra región pequeña del cuadrado. Cuando la geometría intrínseca de una variedad tiene una uniformidad de este tipo se dice que la geometría es localmente homogénea.

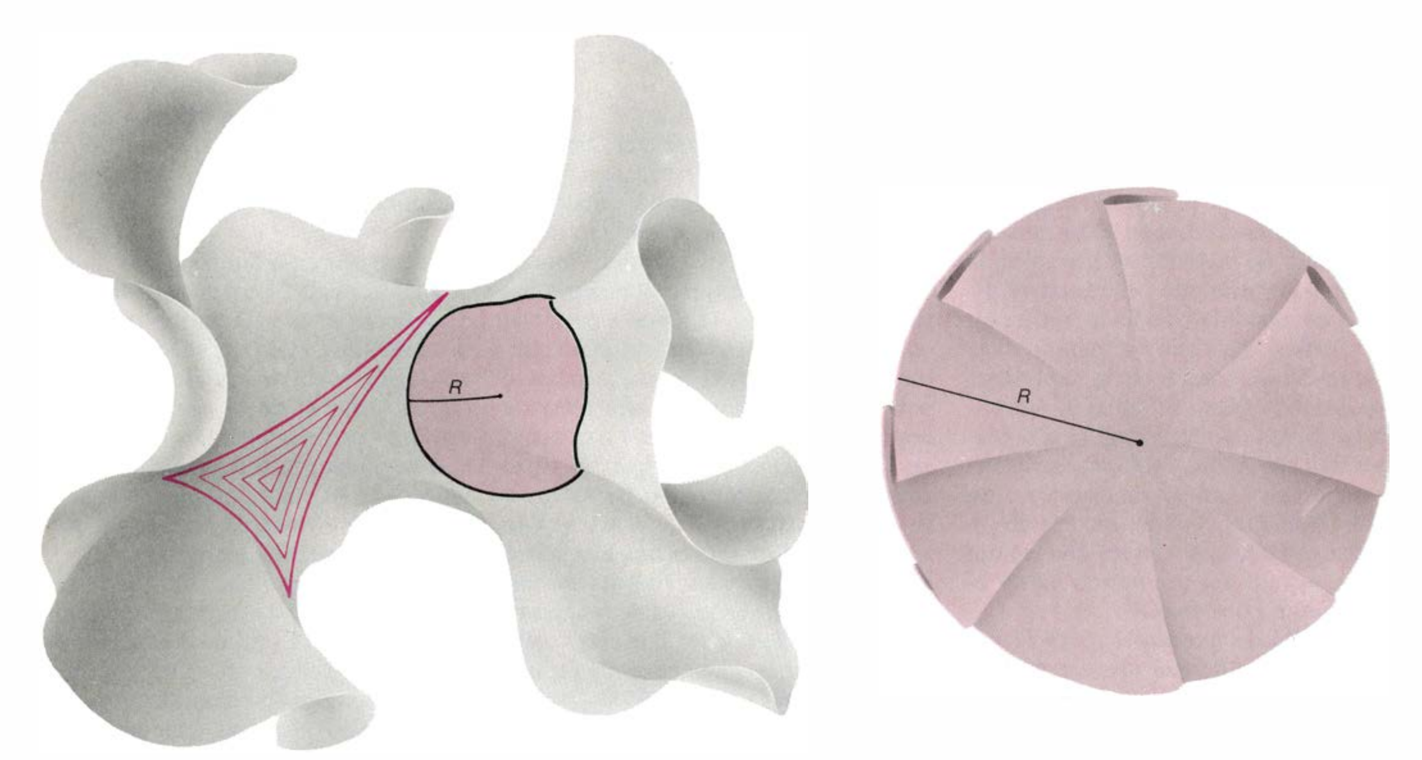
La introducción del concepto de homogeneidad local supuso un avance importante en la comprensión de las bivariedades. Hace alrededor de 100 años se demostró que cualquier superficie –no sólo la de la rosquilla de un agujero– podía generarse de suerte tal que su geometría fuera localmente homogénea. Además, ninguna variedad puede admitir más de un tipo de geometría localmente homogénea.

Para una superficie sólo hay tres tipos de geometría intrínseca localmente homogénea. El primero es la simple geometría euclídea del plano. En el plano, la longitud de una circunferencia es igual a pi veces su diámetro, y la suma de los ángulos interiores de un triángulo vale 180 grados. Se dice que el plano tiene curvatura gaussiana cero, que es una medida de la forma intrínseca de una superficie que Carl Friedrich Gauss estudió. La segunda geometría localmente homogénea es la geometría de la superficie de una esfera. Un casquete circular cortado de la superficie de una esfera se agrieta cuando lo aplastamos sobre un plano de modo similar al trozo de región convexa de la





10. LA GEOMETRIA DE UNA ESFERA, que recibe el nombre de geometría elíptica, difiere de la geometría euclídea ordinaria del plano. Los ángulos interiores de un triángulo en la esfera no suman 180 grados como en el plano; antes bien, dicha suma aumenta con el área del triángulo esférico (*ilustración de la izquierda*). Un casquete circular cortado de una esfera y aplastado sobre el plano se agrietaría, como se muestra en el gráfico esquemático de la derecha. El área de un círculo en la esfera es menor que el área de un círculo del mismo radio en el plano. La esfera tiene curvatura positiva constante.



11. GEOMETRIA DE UNA SUPERFICIE de curvatura negativa constante (*izquierda*) llamada geometría hiperbólica. La suma de los ángulos interiores de un triángulo es menor que 180 grados, suma que disminuye al dilatarse el triángulo. Un círculo cortado de una superficie hiperbólica se arrugaría y solaparía, tal como se muestra a la derecha; su área es mayor que la del círculo del mismo radio en el plano. Se puede hacer un modelo de papel de una superficie hiperbólica pegando muchos triángulos equiláteros a lo largo de sus lados, de tal modo que se encuentren siete triángulos en cada vértice.

rosquilla de tres agujeros. Por tanto, la longitud de una circunferencia en la esfera es menor que la de una circunferencia del mismo radio en el plano. La longitud que falta sugiere el nombre clásico de la geometría localmente homogénea de la esfera: geometría elíptica, de la palabra griega para "quedarse corto". Los ángulos interiores de un triángulo construido sobre la esfera suman más de 180 grados; cuanto mayor es la razón del área del triángulo al área de la superficie de la esfera, mayor es la suma de los ángulos [*véase la figura 10*]. La esfera tiene curvatura gaussiana positiva constante.

Como se podría esperar, una circunferencia cortada de una superficie que tenga el tercer tipo de geometría localmente homogénea se solapa cuando es aplastada, como le ocurre a un trozo de la rosquilla de tres agujeros de la región próxima a un agujero. La longitud de tal circunferencia es mayor que la de la circunferencia correspondiente en el plano. La geometría se llama por tanto geometría hiperbólica, de la palabra griega para "exceso". Es imposible definir una superficie hiperbólica completa con una fórmula analítica, pero se pueden idear modelos aproximados de trozos grandes de una tal superficie [*véase la figura 11*]. Los ángulos interiores de un triángulo construido en la superficie suman menos de 180 grados, y cuanto mayor es el área del triángulo, menor es la suma de los ángulos. La superficie hiperbólica tiene curvatura gaussiana constante negativa.

Resulta instructivo mostrar cómo se le puede dar una geometría localmente homogénea a la rosquilla de tres agujeros. Recuérdese que cada uno de los ocho hexágonos a partir de los cuales se construyó originalmente la variedd podía doblarse y deformarse de cualquier manera, siempre que ninguno de ellos se cortara o rasgase. El método consiste, pues, en deformar cada hexágono de suerte que tenga una geometría localmente homogénea y siga ajustándose a los otros trozos hexagonales de la variedad, como lo hace en la rosquilla de tres agujeros.

En cada vértice se encuentran cuatro de los ocho hexágonos de la rosquilla de tres agujeros. Si los hexágonos fueran euclídeos, en cada vértice los ángulos sumarían 480 grados, lo cual es imposible. Si los hexágonos fueran esféricos, en cada vértice la suma de los cuatro ángulos superaría incluso los 480 grados, lo cual también es imposible. Sin embargo, en el plano hiperbólico, cuanto mayor es el polígono, menores son los ángulos interiores. En el plano hiperbólico, un hexágono suficientemente grande debe tener ángulos interiores de 90 grados; cuatro de esos hexágonos se acoplarían perfectamente en un vértice. Por tanto, si se sitúan los ocho hexágonos sobre la superficie de un plano hiperbólico y se dilatan en ese plano hasta que cada ángulo interior se haya reducido a 90 grados, la variedad construida pegando los ocho hexágonos tendrá una geometría hiperbólica, localmente homogénea. La variedad no puede representarse directamente en su nueva forma, pero sus propiedades geométricas son mucho más simples.

El lector puede disfrutar comprobando que la superficie de cualquier rosquilla de dos o más agujeros puede cortarse en hexágonos de forma que se encuentren cuatro en cada vértice. A la variedad resultante podemos darle una geometría hiperbólica construyéndola a partir de hexágonos hiperbólicos con los ángulos rectos. Un procedimiento más tradicional consiste en abrir la superficie en un polígono con los lados identificados de tal forma que los vértices se confundan en un punto de la superficie. La rosquilla de tres agujeros, por ejemplo, puede abrirse en un dodecágono, o polígono de 12 lados, así como en 8 hexágonos. Con una superficie de complejidad suficiente, el polígono que se obtiene al cortar debe tener al menos seis vértices. Si los seis

vértices han de coincidir correctamente, deberá reducirse los ángulos interiores del polígono. La reducción se consigue dilatando el polígono en el plano hiperbólico. Cuando los lados del polígono se pegan dos a dos, la nueva superficie es topológicamente idéntica a la original, pero tiene la geometría localmente homogénea del plano hiperbólico.

Sólo hay cuatro superficies acotadas para las que la geometría localmente homogénea no es hiperbólica, por tener menos de seis lados los polígonos que se obtienen al cortar la superficie. La rosquilla de un agujero da lugar a un cuadrado; los cuatro vértices del cuadrado pueden pegarse sin cambiar los ángulos interiores. Como no es necesaria ninguna otra modificación, la geometría localmente homogénea que se da al bitoro es euclídea. Análogamente, a la esfera y a una bivariedad no orientable llamada plano proyectivo se le confiere una geometría elíptica; la bivariedad no orientable conocida como botella de Klein adquiere una geometría euclídea.

Una trivariedad se puede curvar de una manera parecida a como lo hace una superficie: todo corte bidimensional de una trivariedad positivamente curvada se agrietaría si se colocara en el espacio euclídeo ordinario; todo corte bidimensional de una trivariedad negativamente curvada se arrugaría y se solaparía. Tanto la geometría elíptica, como la euclídea y la hiperbólica tienen sus contrapartidas tridimensionales.

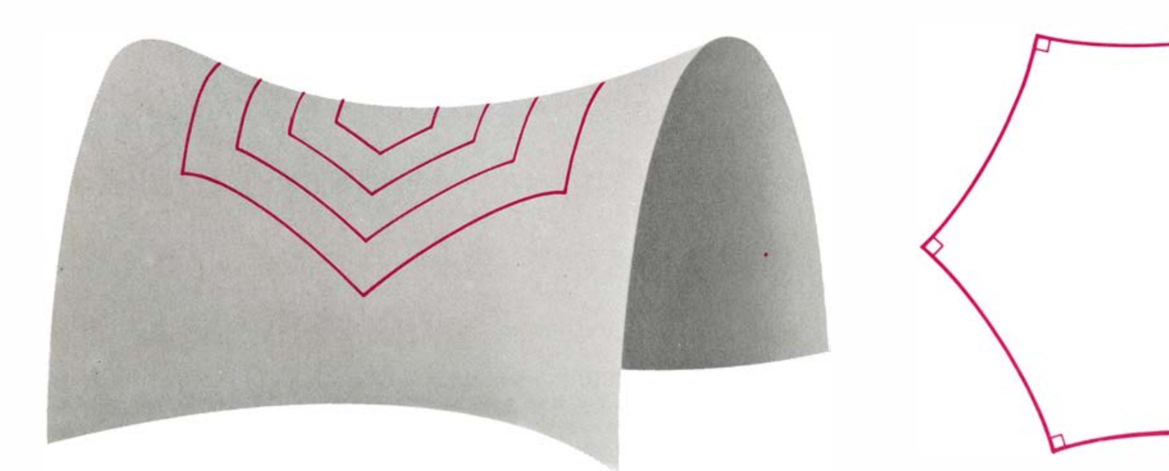
En 1976, uno de nosotros (Thurston) sugirió que la geometría hiperbólica localmente homogénea podría ser la clave para entender casi todas las trivariedades. El desarrollo de esta idea ha constituido una sorpresa para muchos topólogos, porque las trivariedades son muchísimo más complicadas que las bivariedades. Mientras que cualquier bivariedad orientable puede ser clasificada y determinada por su género, cada trivariedad, como un lazo enredado de cuerda, parece tener sus propiedades distintivas, resistiéndose a encajar en una categoría mayor. No obstante, con un examen más detenido, han empezado a surgir categorías más amplias de trivariedades. Esto ha sido una consecuencia del hecho de que muchas trivariedades admiten una geometría localmente homogénea.

¿Cómo se puede imponer a una variedad una estructura geométrica tan simple? Un procedimiento similar al que hemos descrito para bivariedades es válido para un gran número de casos. Se corta la variedad hasta formar un poliedro; a continuación se debe determinar cuántos vértices del poliedro han de coincidir en un punto cuando el poliedro se vuelva a pegar. Por ejemplo, en el espacio de Seifert-Weber los 20 vértices del dodecaedro que genera el espacio han de pegarse en un solo punto. El ángulo sólido de cada vértice de un dodecaedro euclídeo es demasiado grande para que los 20 vértices coincidan correctamente en un punto. Ahora bien, situando el dodecaedro en el espacio hiperbólico tridimensional puede ser dilatado hasta que el ángulo sólido de cada vértice se achique lo suficiente como para empaquetar 20 vértices con los ángulos iguales en un solo punto [*véase la ilustración de la portada de este número*]. Cuando se pegan las caras opuestas de un dodecaedro hiperbólico después de una rotación de 3/10 de vuelta, la variedad resultante es un espacio de Seifert-Weber con una geometría hiperbólica localmente homogénea.

El espacio dodecaédrico de Poincaré también se construye pegando las caras de un dodecaedro, pero los vértices se pegan en cinco grupos de cuatro. El ángulo sólido del vértice de un dodecaedro ordinario es un tanto pequeño para que se puedan ajustar cuatro de ellos alrededor de un punto, sin dejar huecos; pero un dodecaedro suficientemente grande en un espacio curvado positivamente tendrá los ángulos con el tamaño adecuado. El dodecaedro dilatado posibilita la construcción del espacio dodecaédrico de Poincaré con una geometría elíptica localmente homogénea [*véase la figura 14*]. En este contexto vale la pena mencionar el modo en que se da una geometría localmente homogénea al tritoro. En la construcción de la variedad se pegan los ocho vértices de un cubo. Como las ocho esquinas pueden ajustarse en un punto sin necesidad de distorsionarlas, la geometría localmente homogénea del tritoro es euclídea.

Para que el lector no se llame a engaño, debemos señalar que los ejemplos anteriores no son realmente típicos: gozan de una elevada simetría. Cuando se define una trivariedad pegando las caras de un poliedro irregular, hay que proceder con más cuidado para darle al poliedro una forma que conduzca a una geometría localmente homogénea para la trivariedad. Las formas de las caras del poliedro que han de pegarse deben casar bien; los ángulos entre las caras que circundan cada borde deben sumar 360 grados.

Hay al menos dos diferencias importantes entre la geometría de las bivarie-



12. LA ABERTURA de los ángulos de un hexágono regular pueden reducirse si se deja que el hexágono se haga mayor sobre una superficie hiperbólica. En la ilustración, el hexágono crece hasta que cada ángulo interior es igual a un recto. De los ocho hexágonos del espacio de configuraciones de las tres dobles manivelas, deben encontrarse cuatro en cada vértice; por consiguiente, los seis ángulos interiores de cada hexágono deben ser rectos. Si los ocho hexágonos se deforman topológicamente en hexágonos hiperbólicos con los ángulos rectos y, luego, se pegan como antes, la bivariedad resultante adquiere una curvatura constante; su geometría se dice que es localmente homogénea. La geometría del espacio de configuraciones se simplifica así en gran medida.

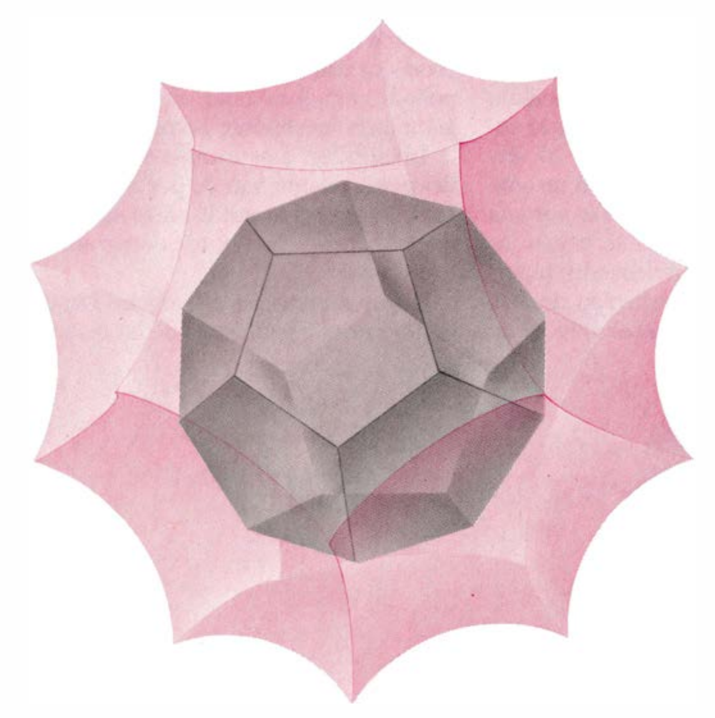
dades y de las trivariedades. Primera, hay cinco tipos más de geometrías localmente homogéneas que se puedan dar a las trivariedades, además de las tres que hemos mencionado. Las geometrías adicionales se presentan porque en tres o más dimensiones se define una curvatura intrínseca para cada corte bidimensional que pase por un punto. Una geometría localmente homogénea no tiene por qué poseer la misma curvatura en todos los cortes bidimensionales. No obstante, una manera de entender la curvatura intrínseca de las ocho geometrías se puede basar sobre las geometrías bidimensionales más sencillas.

La segunda diferencia entre las variedades de dimensión dos y las de dimensión tres podría parecer que presenta complicaciones insuperables. Es posible combinar trivariedades de suerte que se obtengan nuevas trivariedades a las que no cabe conferir una geometría localmente homogénea. Menos mal que los topólogos saben cómo descomponer una trivariedad en trozos primitivos por métodos topológicos.

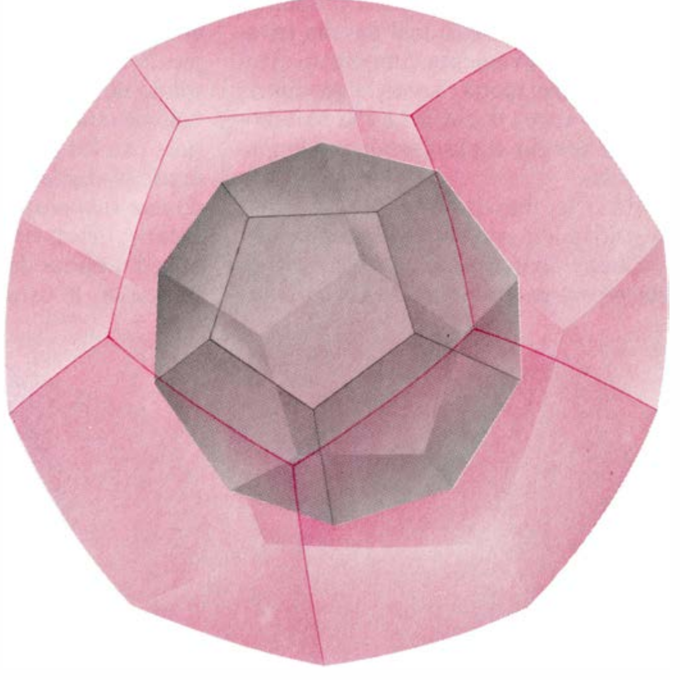
Uno de los autores (Thurston) ha conjeturado que después de descomponer una variedad en sus trozos primitivos, cada uno de éstos admite una geometría localmente homogénea de uno de los ochos tipos posibles. Este resultado se ha demostrado para una amplia clase de variedades; se ha comprobado empíricamente para muchos otros ejemplos, ya sea a mano o con la ayuda de ordenador, y nunca ha fallado. Parece improbable que se aduzca algún contraejemplo.

Los estudios empíricos sugieren también que, para la mayoría de las trivariedades, las complicaciones de su geometría no entran en juego. Se ha demostrado que, en cierto sentido técnico de la palabra, a "la mayoría" de las trivariedades se les puede dar una geometría localmente hiperbólica. El descubrimiento es afortunado, porque las trivariedades hiperbólicas presentan muchas propiedades interesantes. Por ejemplo, en 1971, G. D. Mostow, de la Universidad de Yale, demostró que si una trivariedad podía recibir una geometría localmente hiperbólica, entonces la geometría estaba completamente determinada por la topología. Del teorema de Mostow síguese que todas las variedades dotadas de una geometría localmente homogénea pueden, en principio, ser clasificadas. Además, para las trivariedades hiperbólicas, el teorema da un test de identidad tosco pero eficaz. Cuando se deforma una variedad en su configuración geométricamente manejable, se puede medir su volumen; el teorema garantiza, además, que el volumen depende sólo del tipo topológico de la variedad. Con frecuencia puede resultar muy difícil distinguir dos variedades en su forma topológica abstracta; el volumen se ofrece, pues, como un sello característico y manejable para cada variedad.

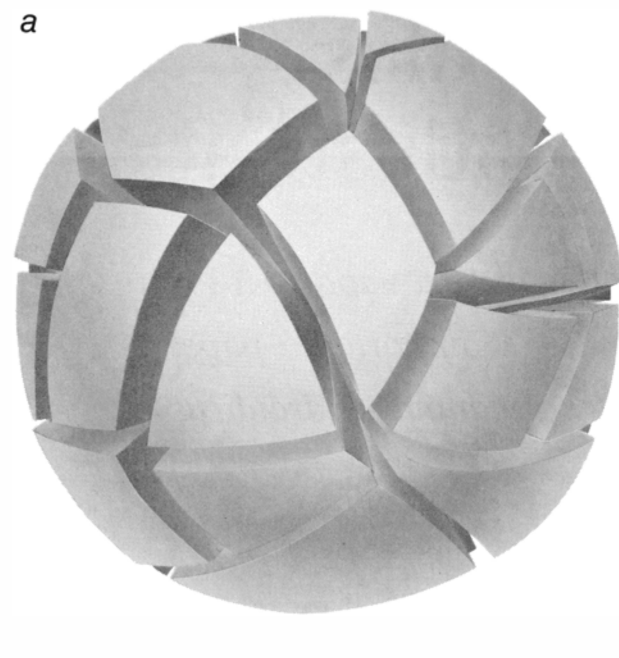
Con estos resultados por delante vale la pena volver a nuestras especulaciones iniciales sobre la estructura topológica del universo. De acuerdo con las observaciones, el universo sería homogéneo por todas partes y tendría una geometría elíptica, hiperbólica o euclídea. Goza también de sólida apoyatura la teoría según la cual el universo se encuentra en un estado de expansión que ha continuado desde el comienzo de la gran explosión. Es interesante especular qué nos reserva el futuro lejano, pero todas las posibilidades se reducen a dos. Por mor de la primera, la mutua atracción gravitacional de la materia en el universo acabaría parando la expansión, determinando la contracción del universo en un "gran colapso". En virtud de la segunda, la atracción gravitacional no sería lo suficientemente fuerte para detener la expansión, y el universo continuaría expandiéndose.

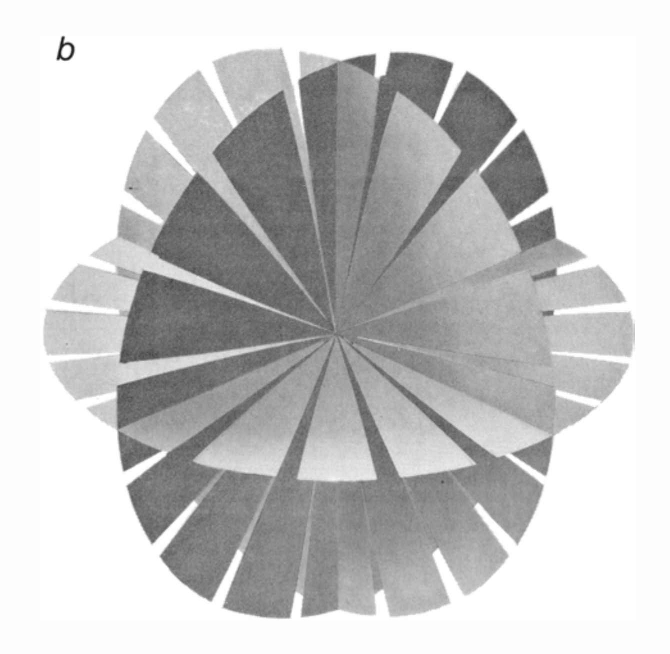


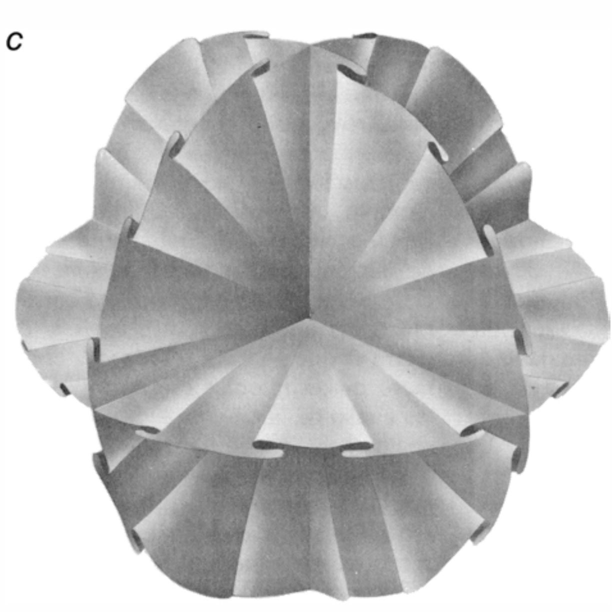
13. ESPACIO DE SEIFERT-WEBER: admite una geometría localmente hiperbólica, si se deja que el dodecaedro que lo genera se dilate en el interior de un espacio hiperbólico. La dilatación de un poliedro en un espacio hiperbólico es similar al de un polígono en una superficie hiperbólica. Cuando el dodecaedro aumenta de tamaño, el ángulo sólido de cada vértice disminuye; así, cada vértice va haciéndose progresivamente más agudo. Los pegamientos abstractos que conducen al espacio de Seifert-Weber determinan que los 20 vértices del dodecaedro coincidan en un punto. El ángulo sólido de cada vértice debe, por tanto, disminuir en el espacio hiperbólico hasta que los veinte vértices sean lo suficientemente pequeños para poder ajustarse alrededor de un punto.

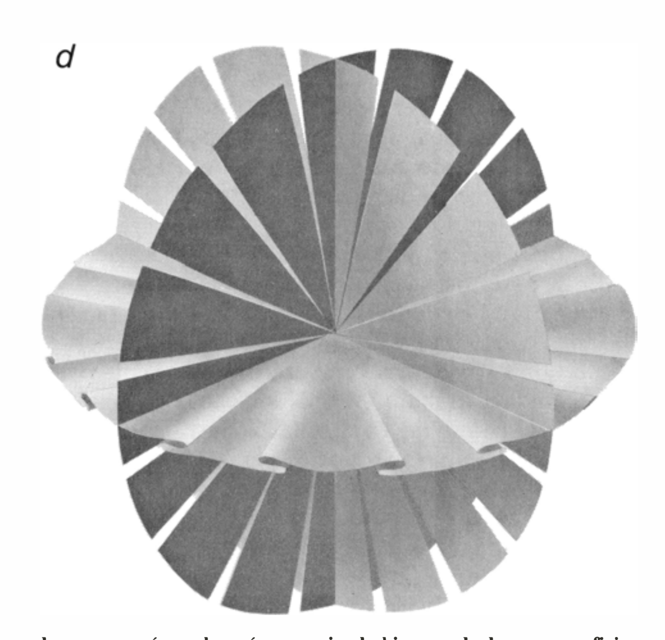


14. ESPACIO DODECAEDRICO DE POINCARE: se genera también pegando pares de caras opuestas de un dodecaedro. En este caso, sin embargo, una cara de cada par se pega a su opuesta después de una rotación de 1/10 de vuelta, en lugar de los 3/10 de vuelta requeridos para el espacio de Seifert-Weber. Los pegamientos abstractos conducen a la identificación de cuatro vértices del dodecaedro en cada vértice de la variedad. El ángulo sólido de cada vértice de un dodecaedro ordinario es ligeramente menor de lo necesario para que se ajusten perfectamente cuatro alrededor de un punto, pero los ángulos sólidos pueden ser aumentados si el dodecaedro se dilata en un espacio elíptico. El efecto es el opuesto al de la dilatación en el espacio hiperbólico.









15. "CORTE" ESFERICO DE UNA TRIVARIEDAD curvada, análoga a los trozos circulares de las bivariedades representadas en las figuras 10 y 11, y que no puede encajar en el espacio euclídeo ordinario sin ser deformado. Una variedad positivamente curvada se agrietaría por todas partes (*a*); cada corte bidimensional de la variedad tiene la curvatura de una esfera ordinaria (*b*). Análogamente, todo corte bidimensional de una trivariedad negativamente curvada se arrugaría y solaparía como si se hubira secado de una superficie hiperbólica (*c*). Una trivariedad cuya curvatura varíe con la dirección puede mantener una geometría localmente homogénea, siempre que la pauta de variación sea la misma en todo punto. Por ejemplo, un corte de la variedad se arrugaría y solaparía en el espacio ordinario, mientras que otros dos podrían agrietarse (*d*). (Las ilustraciones han sido realizadas por Ian Worpole.)

Prevé la teoría general de la relatividad que el destino último del universo depende de su geometría. Si el universo tiene una geometría elíptica, con el tiempo volverá a colapsar. Si tiene una geometría hiperbólica, la expansión continuará siempre. Si tiene una geometría euclídea, también se expandirá indefinidamente, pero la velocidad de expansión se aproximará a cero. En principio, cabría determinar la geometría del universo trazando un triángulo enorme y midiendo con precisión sus ángulos interiores. Si la suma de los ángulos fuera mayor que 180 grados, la geometría del espacio sería elíptica; si fuera igual a 180 grados, la geometría sería euclídea y si la suma fuera menor que 180 grados, la geometría sería hiperbólica. En la práctica, los cosmólogos tratan de estimar la densidad de la materia en el universo y la velocidad de la expansión, porque la geometría del universo puede ponerse en relación con esas dos medidas. Si la densidad es suficientemente alta para una velocidad de expansión dada, el universo acabará colapsando.

Sin embargo, está muy extendida la opinión errónea de que la curvatura del universo determina que éste sea de extensión finita o infinita. Se afirma con frecuencia que, si el universo es finito, su geometría debe ser elíptica y, recíprocamente, que si la geometría del universo es hiperbólica, el universo debe ser infinito. El espacio de Seifert-Weber, que es una trivariedad finita con una geometría localmente hiperbólica, prueba que ninguna de esas aseveraciones es cierta. En efecto, la mayoría de los modelos finitos de espacio son trivariedades como el espacio de Seifert-Weber con una geometría localmente hiperbólica. Tales variedades dan modelos de un universo finito que se expande indefinidamente.

Raíces medievales de la revolución industrial

Suele fecharse la revolución en la llegada del vapor, en los siglos XVIII y XIX. Se destaca ahora el importante papel que desempeñaron mucho antes las máquinas hidráulicas

Terry S. Reynolds

A menudo se sitúa los orígenes de la industria moderna a finales del siglo XVIII y principios del XIX, cuando las máquinas de vapor desplazaron el trabajo manual, primero en la industria textil del algodón y posteriormente en otras. Se conoce vulgarmente este período por Revolución Industrial, expresión que viene a sugerir que se produjo una ruptura brusca del curso de los siglos anteriores.

La historia de la energía hidráulica en la Europa medieval y principios de la Edad Moderna da una imagen diferente. Las máquinas empezaron a arrinconar el trabajo manual mucho antes del siglo XVIII; en algunas zonas de Europa lo hicieron a una escala importante y en no pocas industrias. En otras palabras, el auge de la industria europea debe considerarse mejor un proceso evolutivo que se remonta, al menos, hasta los siglos VIII o IX, cuando los ingenieros europeos comenzaron a aplicar con empeño la energía hidráulica a los procesos industriales.

Aunque son muchos los dispositivos capaces de aprovechar la energía hidráulica, el más común es, desde luego, una rueda con palas o cangilones, que puede colocarse horizontal o verticalmente. Hasta la introducción de la turbina de agua, en el decenio de 1830, la más sencilla de las dos era la rueda hidráulica horizontal. En los primeros molinos hidráulicos de rueda horizontal, el extremo inferior de un eje vertical llevaba una pequeña rueda horizontal que sólo tenía palas. El extremo superior del eje se unía directamente, sin engranajes, a una piedra de molino giratoria. Esa clase de molino, fácil de construir, no generaba más potencia que el équido de turno (menos de un caballo de vapor). Peor aún, la producía con despilfarro, pues su rendimiento se situaba entre el cinco y el 15 por ciento. El molino horizontal no se adaptaba con la facilidad del vertical a tareas que no fueran la de la molienda, de ahí el escaso papel que desempeñó en la primitiva evolución de la industria hidráulica europea.

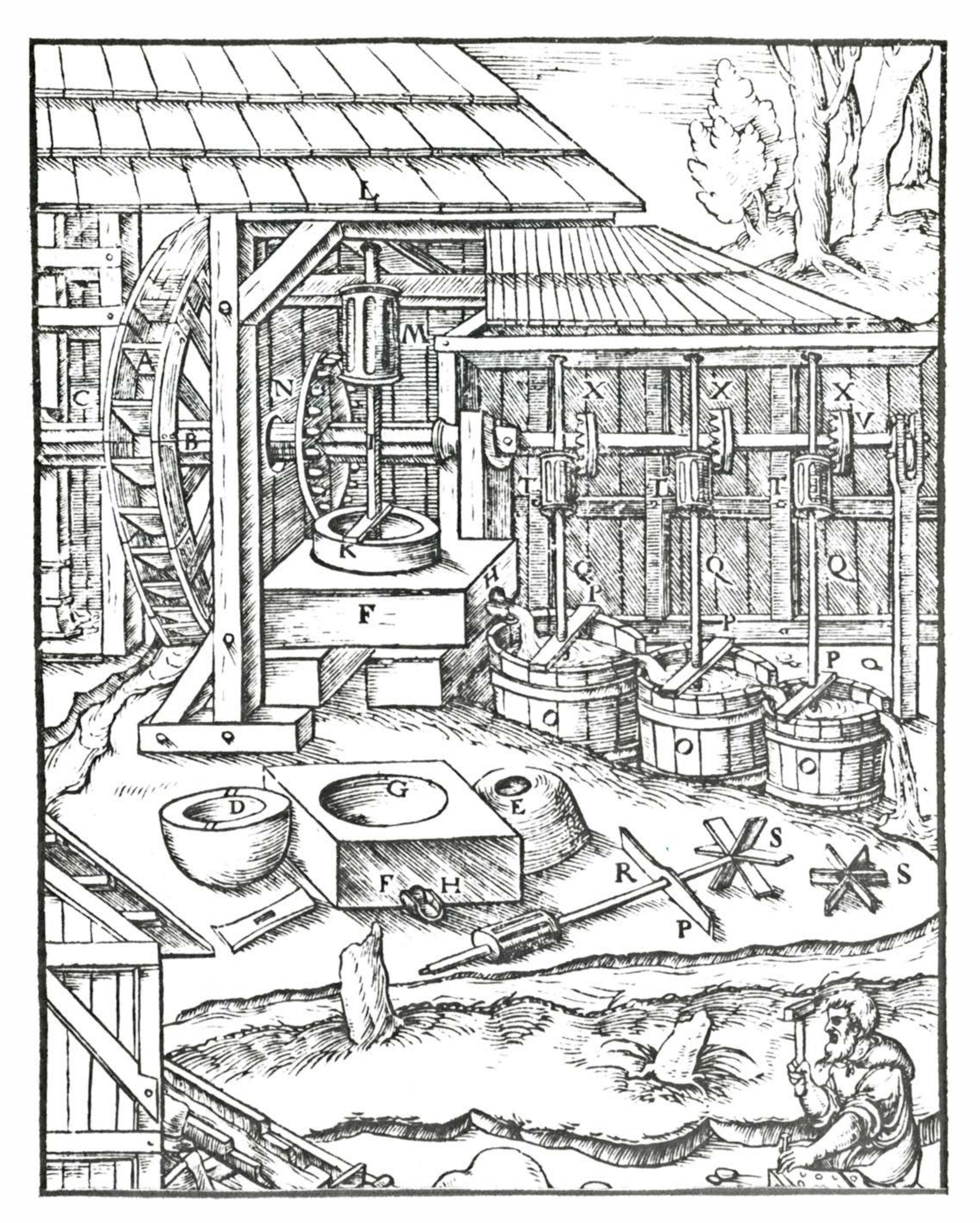
En cambio, a las ruedas hidráulicas verticales sí les correspondió un papel destacado. Se contaban dos subtipos principales de rueda vertical: de alimentación inferior y de alimentación superior. La primera era más sencilla. Tenía palas planas radiales unidas a su circunferencia y tomaba la energía del impacto del agua que fluía por debajo de la rueda y empujaba las palas. La rueda de alimentación inferior podía trabajar casi en cualquier cauce, siempre que hubiera suficiente flujo de agua a velocidades moderadas, pero rendía mucho más en canales o cursos regulados. Sus prestaciones características eran de tres a cinco veces mayores que las de una rueda horizontal (es decir, dos o tres caballos de vapor) y su rendimiento era del 20 al 30 por ciento.

En las de alimentación superior, el agua caía por encima de la rueda, en cangilones practicados en el interior de la circunferencia de la rueda. El peso del agua, más que su impacto, hacía girar la rueda, descargándose cada cangilón en la parte inferior de la rueda y subiendo vacío para empezar de nuevo el ciclo. La construcción de ruedas de alimentación superior era más difícil que la de ruedas de alimentación inferior u horizontales: requerían una presa y un cauce elevado y no podían utilizar grandes volúmenes de agua. Sin embargo, con un pequeño volumen y una fuente que cayera desde tres a 12 metros se alcanzaban rendimientos del 50 al 70 por ciento y transmitían a cualquier parte de dos a 40 caballos de vapor. (La media era de cinco a siete.)

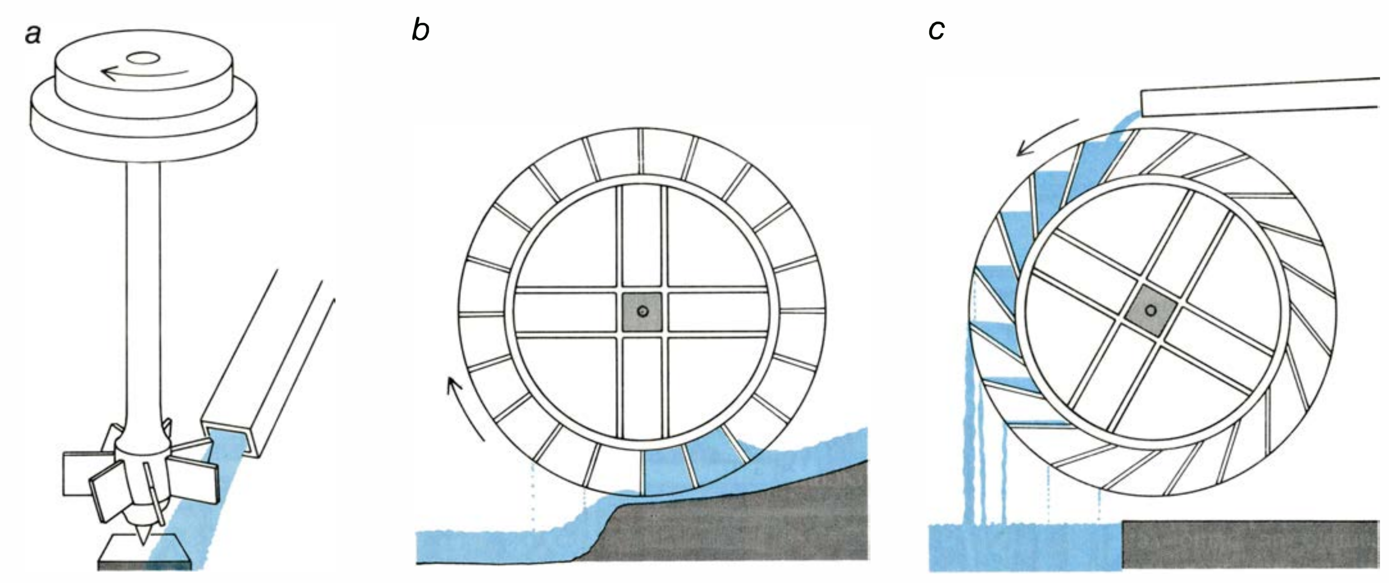
Aunque los ingenieros de la antigüedad proyectaron tanto ruedas de alimentación superior como inferior, su construcción no se generalizó. Por ejemplo, en el siglo I a. C. el ingeniero romano Vitruvio describió una rueda de alimentación superior en una sección de su *De architectura* dedicada a máquinas que rara vez se usaron. Lo cierto es que no llega a la docena el número de testimonios escritos, referentes al uso de la energía hidráulica, que nos ha legado la antigüedad.

En la Europa medieval, las condiciones económicas y sociales apremiaron la necesidad de dicha energía y abrieron el camino hacia la sustitución del trabajo manual por máquinas. Uno de los elementos más decisivos en el cambio del clima tecnológico en la Europa occidental fue el sistema monástico, basado en la regla dictada por San Benito a principios del siglo VI. Dos normas de esa regla estimularon la introducción de la energía hidráulica; primera: durante ciertos períodos, rígidamente regulados, los monjes debían dedicarse al trabajo manual, la lectura y el estudio y a prácticas espirituales, como la meditación y la oración; segunda: el monasterio tenía que ser autosuficiente y aislarse de la influencia humana.

La regla benedictina dio aliciente al desarrollo de la energía hidráulica, puesto que sólo aprovechándola en las tareas manuales tediosas, como la del molido de grano, los monasterios podrían hacerse autosuficientes y dejaría a los monjes tiempo para el estudio y la oración. Tal vez la orden monástica



1. MOLINO MULTIUSO DE MINERAL impulsado por una sola rueda hidráulica, arriba, a la izquierda, ilustrado en *De re metallica*, de Georgius Agricola, publicado en 1556. El mineral de oro se procesaba en las siguientes etapas: primero se trituraba con un martillo accionado por levas (*c*), situado junto a la izquierda de la rueda. Después, el mineral triturado se reducía a polvo con un par de piedras de moler, a la derecha de la rueda. Dos piedras de moler cóncavas de repuesto (*d, e*) aparecen en el suelo, a los lados de otra de repuesto convexa. La salida del mineral en polvo (*h*) por el lateral de la piedra convexa lo depositaba en la primera de las tres tinas de separación (*o*). La lechada de mineral pulverizado se agitaba en las tinas por medio de paletas movidas por dientes (*x*) sujetos al eje de la rueda. La agitación separaba el oro, más pesado, de la escoria, más ligera, que rebosaba de la última tina.



2. LAS RUEDAS HIDRAULICAS MEDIEVALES giraban horizontalmente sobre un eje vertical (*a*), o verticalmente sobre un eje horizontal (*b, c*). La rueda horizontal, antepasado de la turbina, se llamaba molino nórdico; de pobre rendimiento, no conoció otra aplicación destacable que la de moler harina. La primera rueda vertical (*b*) se denomina de alimentación inferior, pues el agua pasa por debajo de ella; sus principales virtudes las constituían el bajo coste y la simplicidad de instalación. La rueda de alimentación superior (*c*) requiere de un buen salto de agua o una presa que asegure la caída.

que más empeño puso en el desarrollo de la energía hidráulica fue la cisterciense. Hacia 1300 había más de 500 monasterios de esa observancia. Prácticamente todos tenían molinos hidráulicos, muchos con cinco o más.

A la difusión de la energía hidráulica en el medievo occidental contribuyó también otra clase social, la nobleza feudal. Los nobles vieron en la introducción de la energía hidráulica un medio más para obtener ingresos de los campesinos. En algunas zonas de Europa, los señores impusieron a sus siervos la obligación de llevar el grano sólo a sus molinos. Ese monopolio de los molinos, limitado al principio a los de grano, a veces se extendió a otros procesos hidráulicos, por ejemplo el batanado: el acabado del paño de lana. Así, en Europa occidental, dos grandes grupos –el clero y la nobleza territorial– pusieron interés en extender la energía hidráulica. A ellos se les añadió posteriormente un tercer grupo: el de los comerciantes, que vieron en la molienda una forma de acrecentar sus beneficios.

Otras presiones económicas contribuyeron a la expansión de la energía hidráulica en la Europa medieval. En el siglo VII había desaparecido por completo la mano de obra sobrante, auténtico azote del Imperio Romano en su cénit, que desalentó la adopción de la energía hidráulica. La subsiguiente escasez de mano de obra animó la introducción de mecanismos que, como la rueda hidráulica, ahorraran trabajo. También la geografía europea pudo contribuir a su desarrollo. El centro de la civilización europea medieval se encontraba en las cuencas de los ríos que desembocan en el golfo de Vizcaya, el canal de la Mancha y el mar del Norte. En esa región había cientos de ríos pequeños y medianos con un caudal casi permanente, lo cual facilitó el desarrollo de la energía hidráulica. El centro de la civilización clásica, en cambio, estuvo en la cuenca mediterránea donde, dada la sequedad del clima, el caudal de los ríos tendía a ser errático y estacional.

La conjunción de esos factores sociales, económicos y geográficos fomentó un aumento constante de su empleo en Europa, especialmente a partir del siglo IX. En 1500 había ruedas hidráulicas por toda Europa. En algunos lugares, la concentración de máquinas era comparable a la de las fábricas de la revolución industrial del siglo XVIII y XIX. Detengámonos en tres elementos de la tecnología medieval de ruedas hidráulicas: crecimiento numérico, generalización de sus aplicaciones y concentración de la potencia.

En la Europa medieval, la mejor fuente de datos sobre el número de molinos hidráulicos la constituye el censo de Guillermo el Conquistador, elaborado a finales del siglo XI en sus recién adquiridos dominios ingleses. Las zonas inglesas bajo dominación normanda tenían 5624 molinos de agua instalados en más de 3000 lugares, lo que equivalía a un molino por cada 50 familias, aproximadamente. Había zonas de concentración de molinos: en 16 kilómetros a lo largo del mismo cauce podían encontrarse hasta una treintena de ellos. No se registró si tenían ruedas horizontales, de alimentación inferior o superior, ni qué trabajo hacían. Probablemente la mayoría de ellos molieron grano, tediosa labor que, realizada a mano , hubiese consumido de dos a tres horas diarias al ama de casa.

Se carece de datos del mismo período, siquiera tan incompletos, para otros países de Europa. Probablemente algunos de ellos estaban tecnológicamente más avanzados que Inglaterra. Sin embargo, pruebas posteriores indican que la sustitución del trabajo manual por la energía hidráulica tuvo que crecer a un ritmo al menos comparable con el de Inglaterra. Por ejemplo, en 1694, el marqués de Vauban, ingeniero militar francés, estimaba que en Francia había 80.000 molinos de harina, 15.000 industriales y 500 para el hierro y trabajos metalúrgicos. Esto es, un total de más de 95.000, aunque algunos de ellos, especialmente los de harina, no los movía el agua, sino el viento.

Hasta en las regiones industrialmente atrasadas de Europa, como Rusia y Polonia, se conocía el uso generalizado de las ruedas hidráulicas antes de la introducción del vapor. Un informe de 1666 de los afluentes septentrionales del río Dnieper, desde el Sula hasta el Vorskla, cita 50 presas y 300 ruedas hidráulicas. Uno sólo de esos afluentes, el río Udai, tenía 72 molinos hidráulicos. A finales del siglo XVIII había más de 5000 molinos hidráulicos en la parte de Polonia ocupada por Austria.

El continuo crecimiento numérico de

ruedas hidráulicas se vio acompañado de una constante difusión geográfica. En el siglo XIII la rueda hidráulica había dado la vuelta a Europa: del mar Negro al Báltico, de Gran Bretaña a los Balcanes, de España a Suecia.

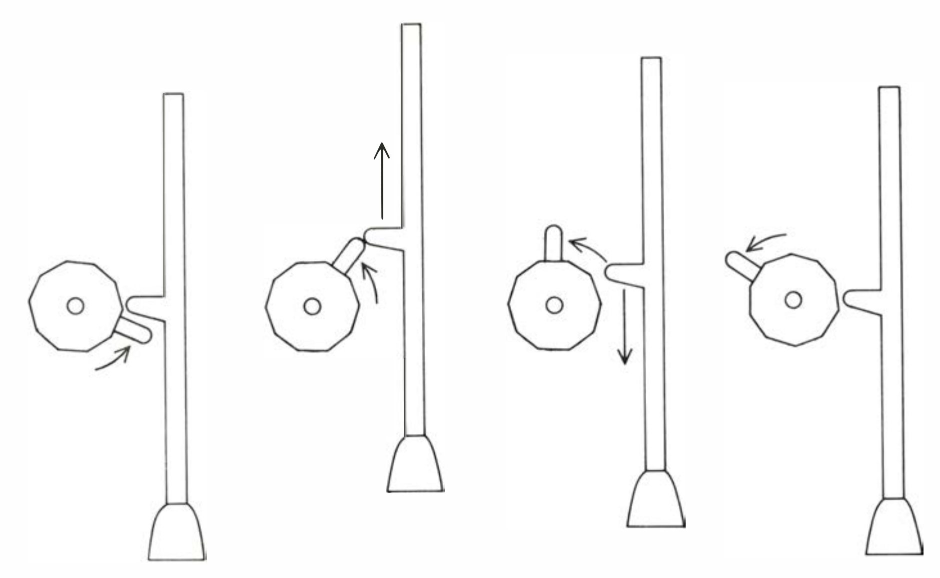
Los ingenieros de la antigüedad sólo aplicaron el movimiento de la rueda hidráulica de dos formas: en el molino de harina y en la noria, una rueda para elevar agua. En esta última, el movimiento se utilizaba directamente: no se transformaba a través de ningún mecanismo. Por el contrario, en el molino de harina, un engranaje en ángulo recto situado en un extremo del eje de la rueda variaba la velocidad de rotación y transformaba el movimiento en el plano vertical de la rueda en un movimiento en el plano horizontal, que hacía girar la piedra. Los ingenieros de la antigüedad no fueron más allá, aunque un poema del poeta romano del siglo IV Ausonio sugiere la posibilidad de mover sierras con ruedas.

A comienzos del siglo IX los constructores de molinos ampliaban los logros obtenidos en la antigüedad. Así, los medievales aplicaron la rueda de agua vertical a varios procesos que, como la elevación de agua de la noria, requerían un movimiento de rotación en el mismo plano. Uno de ellos fue el afilado y pulido de metales en fábricas de cubertería. La primera mención de estas fábricas se encuentra en documentos que datan de principios del siglo XIII. En ellas se utilizaban mecanismos para multiplicar la velocidad de giro del eje de la rueda, no para alterar su plano de rotación, y en algunos casos para variar la dirección del plano de rotación de la piedra de afilar, situada en un eje perpendicular al de la rueda.

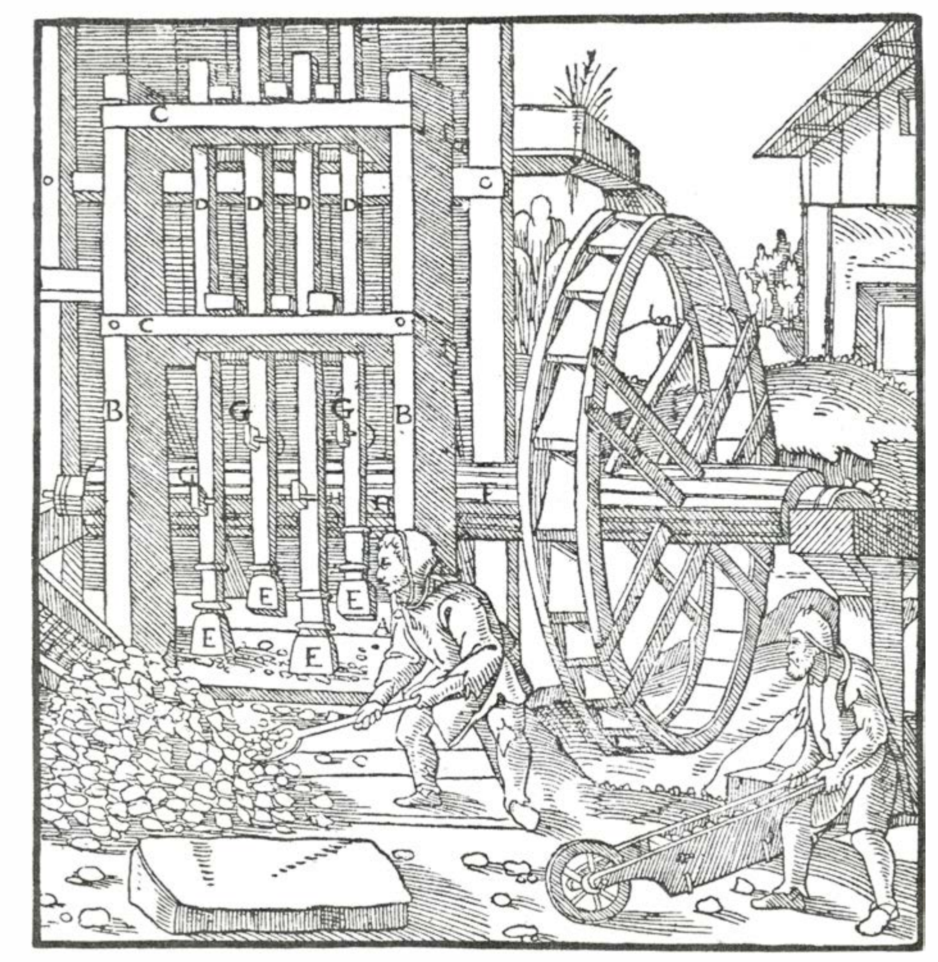
Otros ejemplos de nuevas aplicaciones de la energía hidráulica que aprovechaban el movimiento de rotación de la rueda hidráulica vertical en el mismo plano fueron los batanes (La primera prueba del uso de la energía hidráulica para este fin data del siglo XIV), las perforadoras (en el siglo XV), rodillos para obtener láminas de metal y cizallas giratorias para cortarlas (también en el siglo XV) y ventiladores, montacargas y bombas para minas (todos en el siglo XVI).

Análogamente, los ingenieros medievales extendieron la combinación de ruedas hidráulicas y mecanismos de cambio de plano vertical-horizontal. Ya en el siglo IX, en Francia, se modificaron las tradicionales harineras hidráulicas de manera que en vez de moler trigo (el único uso romano de la combinación de rueda hidráulica y engranje), las piedras molieran malta para preparar la cerveza. Posteriores mecanismos de cambio de plano vertical-horizontal se aplicaron para sustituir el trabajo manual en actividades como el pulverizado de minerales metalíferos.

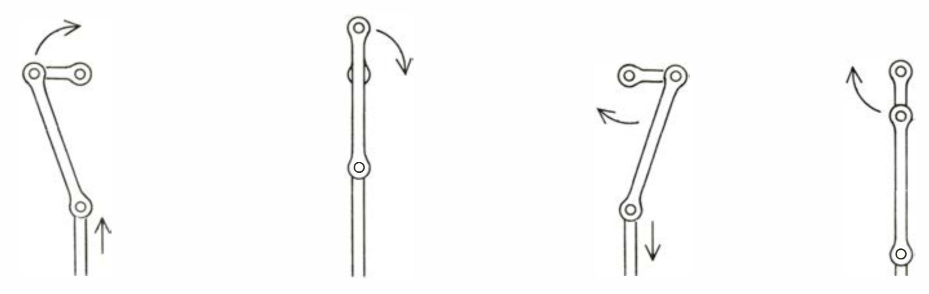
En el siglo XI los mecanismos de cambio vertical-horizontal habían conseguido que las piedras de molino rodaran, unidas a un extremo; más que moler, machacaban. Puede que ya en el siglo



3. TRANSFORMACION DEL MOVIMIENTO DE ROTACION en lineal. Se logra poniendo una leva en el eje de la rueda. La leva giratoria engrana con otra semejante del eje de un apisonador lastrado: al girar el eje propulsor, el apisonador se levanta primero y después se suelta, produciendo un fuerte impacto.



4. PRINCIPIO DE LA LEVA aplicado en este molino de triturado de roca ilustrado en *De re metallica*. Las levas del eje alzan hasta liberar las varillas (*g*) sujetas a los trituradores calzados con hierro.



5. SE TRANSFORMA TAMBIEN EL MOVIMIENTO DE ROTACION en lineal por medio de la biela. Esta debe disponer de una articulación móvil entre el eje que sube y baja y el eje propulsor, que rota.

6. UN PAR DE BIELAS movidas por una rueda de alimentación superior que acciona un tren de dos mecanismos convierten el movimiento de rotación en lineal en esta ilustración de *De re metallica*. El movimiento lineal se transmite a los pistones de dos pares de bombas de mina. La bomba inferior de cada par eleva el agua desde el pozo hasta una artesa, para subirla después con las bombas superiores.

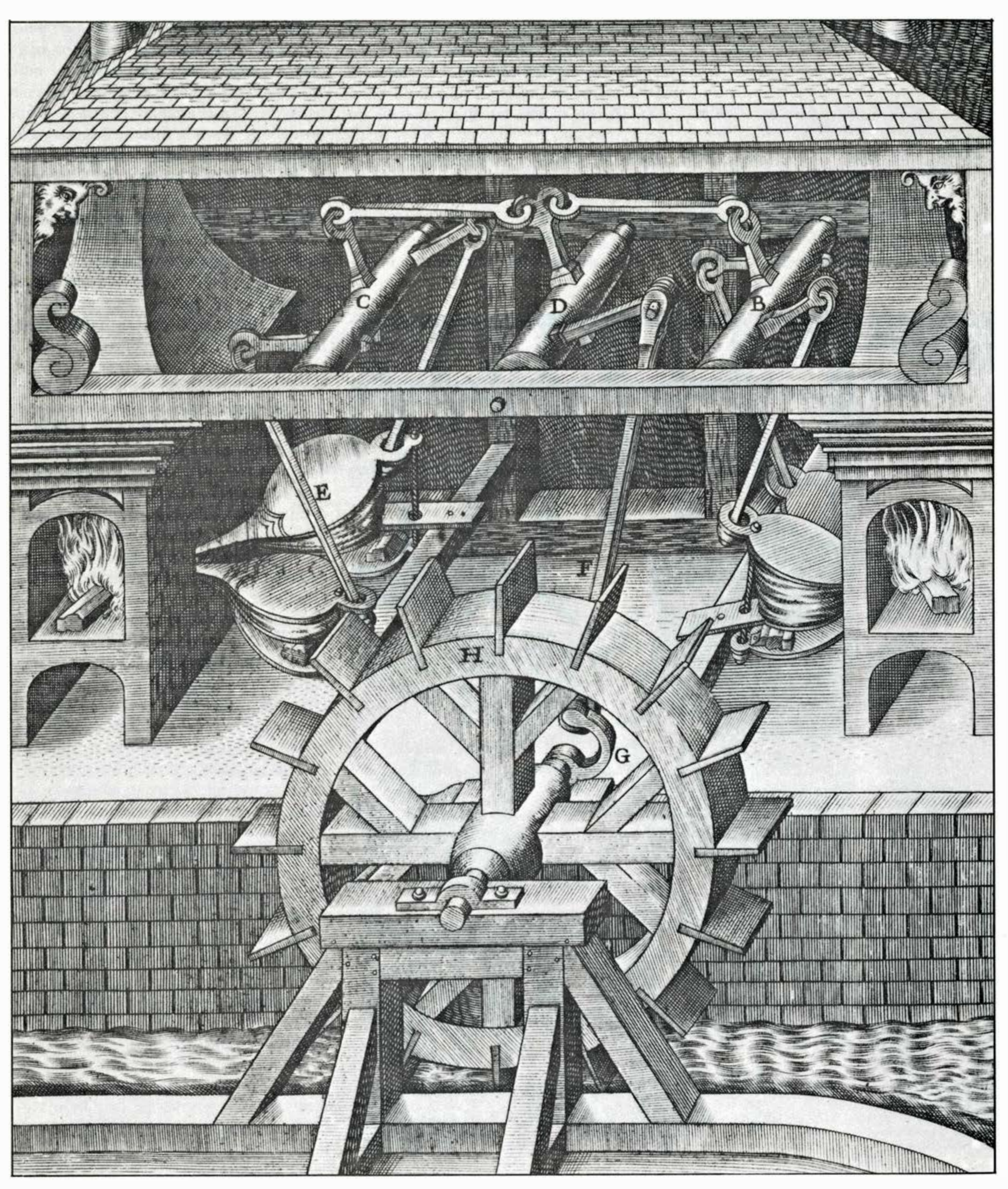
XI esas piedras giratorias sirvieran para extraer aceite de las olivas, y sin duda alguna se utilizaron para este y otros fines en el siglo XII. A principios de ese último siglo, los molinos fueron adoptados por la industria del curtido: reducían la corteza de roble a polvo, paso previo para la lixiviación que rendía tanino. Es posible que ya en el siglo XII se usaran rodillos hidráulicos para exprimir caña de azúcar en Sicilia. Sirvieron posteriormente para exprimir semillas de mostaza (la primera prueba de la aplicación de la energía hidráulica a este propósito data del siglo XIII), semillas de amapola (también en el siglo XIII) y para la obtención de tintes (en el siglo XIV).

Aunque el movimiento de rotación de las ruedas hidráulicas –acelerado, decelerado o cambiado de plano de rotación– podía aplicarse a muchas tareas, otras no necesitaban movimiento de rotación, sino lineal. Por ejemplo, muchas industrias utilizaban movimientos de aporreo y martilleo. Entre ellas estaban la del lavado del paño de lana, la de trituración de menas para fundición, la del forjado del hierro y la de separación de fibras de las plantas de lino. Los técnicos de los siglos X al XV aportaron dos soluciones al problema de la transformación del movimiento de rotación en lineal, necesaria para accionar martillos: la leva y la biela.

La leva fue el dispositivo que se diseñó en primer lugar y, con mucho, el de más amplia aplicación. Su mecanismo era sencillo: básicamente, un pequeño saliente unido a un eje. No constituía ninguna invención medieval: había aparecido en pequeños útiles en la antigüedad, pero nunca se había aplicado a mecanismos de producción a gran escala. Alcanzó su madurez en la Europa medieval y, en combinación con la rueda hidráulica, sirvió principalmente para accionar martillos. En 1500 los ingenieros europeos habían desarrollado dos clases de martillos accionados con agua: el apisonador vertical y el apoyado. En el vertical, una leva situada en un eje horizontal giraba contra un saliente similar de una barra vertical que tenía una cabeza de martillo en su extremo inferior. Al girar la leva, ésta levantaba la barra hasta que perdía contacto; la barra caía entonces dando un martillazo. Con el apisonador apoyado, la leva giraba contra el martillo, situado en un extremo de una barra horizontal que pivotaba sobre el otro extremo, levantando primero el martillo y soltándolo después al continuar el giro.

Podía haberse empleado martillos hidráulicos en el siglo IX en lugar de las piedras modificadas de los molinos de cerveza, pero las primeras industrias que sin duda alguna los adoptaron fueron las del batanado y la del cáñamo de los siglos X y XI. Tras tejer la lana en paños, deben éstos machacarse o aporrearse en una solución limpiadora, lo que obedece a tres propósitos. Primero, limpia el paño y quita gran parte de la grasa de oveja que queda. Segundo, encoge la lana, de forma que posteriormente pueda coserse a la medida con seguridad. Tercero, convierte las fibras de lana en fieltro, reforzándose el tejido.

En la antigüedad, y hasta principios del medievo, el batanado se realizaba a mano. A comienzos del siglo XI la rueda hidráulica y los martillos acciona-



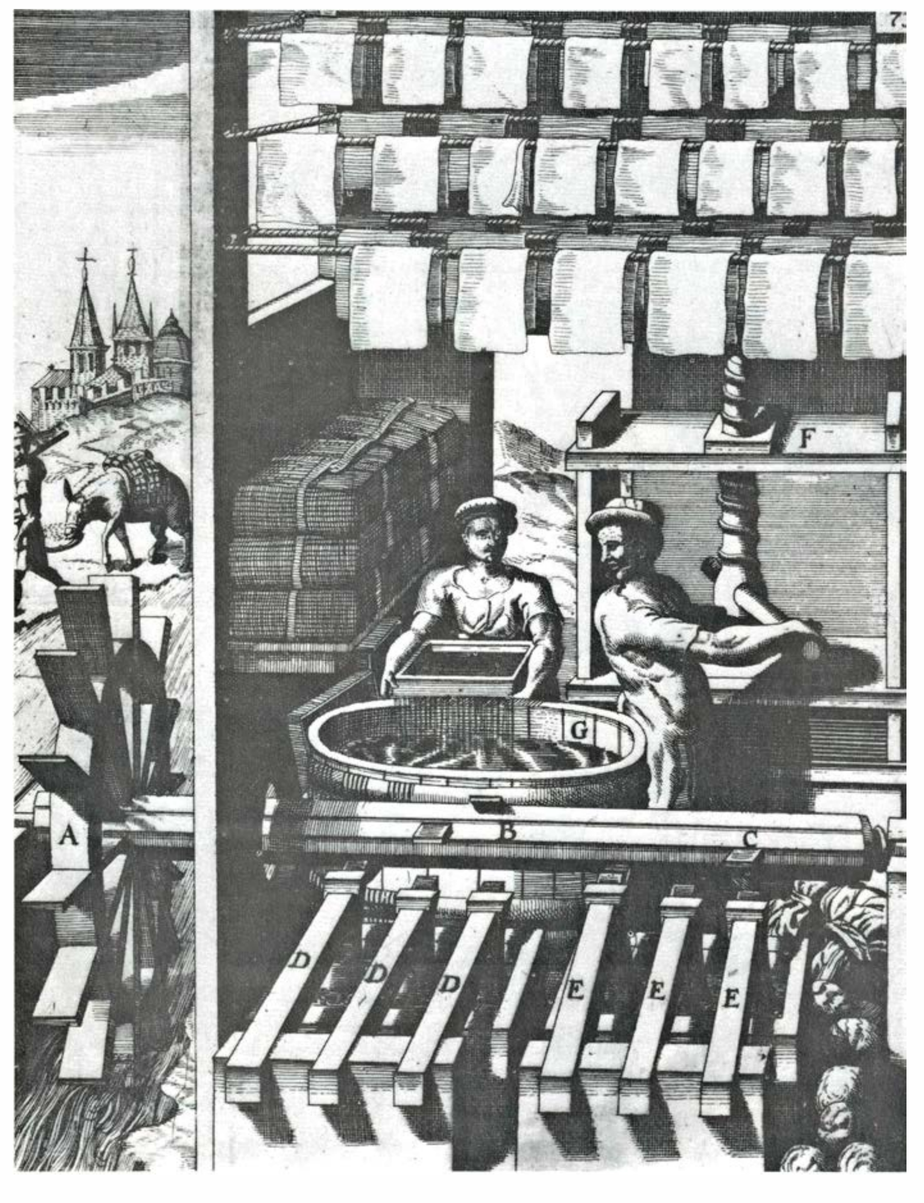
7. HERRERIA DEL SIGLO XVI que disponía de fuelles movidos por una rueda de alimentación inferior para alcanzar altas temperaturas en el horno. De nuevo una biela convertía el movimiento de rotación del eje en movimiento alternativo. (*Le diverse et artificiose machine*; Agostino Ramelli, 1588.)

dos por levas mecanizaron el proceso. En el siglo XIII, el batanado mecánico se practicaba en gran parte de Europa occidental. En Inglaterra, por ejemplo, el molino hidráulico de batanado más antiguo registrado data de 1185. En 1327 había 130 y, antes de acabar el siglo, la industria lanera inglesa se había desplazado casi por completo a lugares con fácil acceso a la energía hidráulica.

La industria del cáñamo adoptó desde primera hora el martillo mecanizado. Tradicionalmente, las fibras del cáñamo empleadas en la producción de sogas y cuerdas se separaban del tejido leñoso de la planta machacando y recogiendo a mano. Los martillos hidráulicos sustituyeron ese trabajo manual en la Francia alpina a finales del siglo X y principios del XI. En el siglo XII había molinos hidráulicos para el cáñamo en toda Francia.

Con el paso del tiempo, el martillo hidráulico se aplicó a muchas otras tareas. Desde que se inventó el papel en Asia, la pasta para hacerlo se producía machacando trapos manualmente en el agua. Hasta principios del siglo XII los europeos occidentales no conocieron la fabricación de papel. A finales del siglo XIII los papeleros europeos dieron un paso más que los chinos y árabes: sustituyeron el martilleo manual por el hidráulico. A principios del siglo XVII, sólo en Inglaterra, había 38 papeleras hidráulicas. En 1710, el número era de 200 y, en 1763, de 350.

Una de las más importantes industrias europeas que se mecanizó en parte con la combinación de la rueda hidráulica vertical y la leva fue la del hierro. A principios de la Edad Media, los metalúrgicos europeos fundían el mineral de hierro en un horno pequeño, suministrando aire a la mezcla incandescente de mineral y carbón vegetal por medio de un fuelle de mano o de pie. El proceso no alcanzaba suficiente temperatura para licuar el hierro. Así, casi a diario el metalúrgico de hierro tenía que apagar el horno y apartarlo para sacar la masa esponjosa conocida como flor, una mezcla porosa de hierro metálico y escoria. Para obtener una forma utilizable de hierro los fabricantes tenían que calentar y martillear la flor repetidamente, consolidando el hierro algo más en cada ciclo y eliminando la escoria. La flor, al igual que el mineral, se calentaba en un horno con un tiro alimentado por un fuelle accionado a mano.



8. FABRICA DE PAPEL donde se empleaba una rueda de alimentación inferior con levas (*c*), que levantaban los martillos colgantes (*d, e*), para reducir los trapos a pulpa. El proceso posterior era manual: la pulpa se trasladaba a una cuba (*g*), se extraía con una criba y se laminaba en una prensa (*f*). Las láminas se colgaban de perchas para el secado. (*Theatrum machinarum novum*; Georg Andreas Böckler, 1662.)

La introducción de la energía hidráulica afectó mucho ambos procesos. Puede que ya en el siglo XI los martillos hidráulicos aparecieran en la fragua del herrero, pues con toda seguridad estaban en servicio en el siglo XIII y eran comunes en el XIV. Los fuelles accionados por levas movidas por ruedas hidráulicas funcionaban en las fraguas a principios del siglo XIII y eran corrientes en el XIV.

En las postrimerías del siglo XIV, la combinación de rueda hidráulica vertical y fuelle accionado por levas había pasado de la fragua al horno de fundición; la producción de hierro experimentó un cambio aún más radical. El empleo de fuelles mayores y más potentes, posibles gracias a la energía hidráulica, permitió a los metalúrgicos alcanzar mayores temperaturas en sus fundiciones, hasta la licuefacción del hierro. Pudo entonces agujerearse el fondo del horno de fundición para que fluyera metal líquido y se solidificara en "lingotes". Se acabó el apagar el horno y apartarlo para obtener la flor; la producción de hierro dejó de ser un proceso discontinuo, transformándose en otro, cuando menos, semicontinuo, con importantes reducciones en las necesidades de mano de obra. Esta nueva aplicación de la energía hidráulica se propagó rápidamente. En 1492, las 38 fundiciones y acerías de la región alemana de Siegen empleaban energía hidráulica.

La combinación de rueda hidráulica y levas se introdujo en otras industrias. En las serrerías hidráulicas, la leva servía para empujar hacia abajo la sierra,

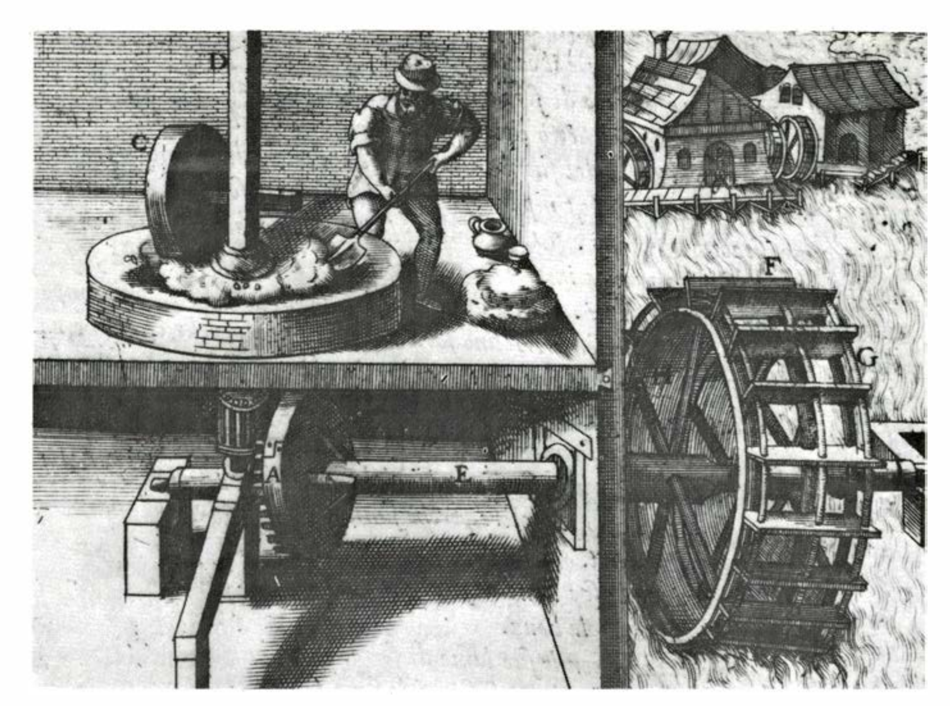
que volvía arriba por medio de una vara muelle. Se mencionan por primera vez serrerías de este tipo en documentos de principios del siglo xiii. Al parecer, esta práctica se propagó rápidamente.

En 1304 se culpaba en parte de la deforestación de la región de Vizille, en el sureste de Francia, a la proliferación de serrerías hidráulicas. Dos siglos después, la rueda hidráulica y la leva se empleaban en elevar martillos para triturar minerales y para impulsar las bombas de émbolo en el drenaje de minas.

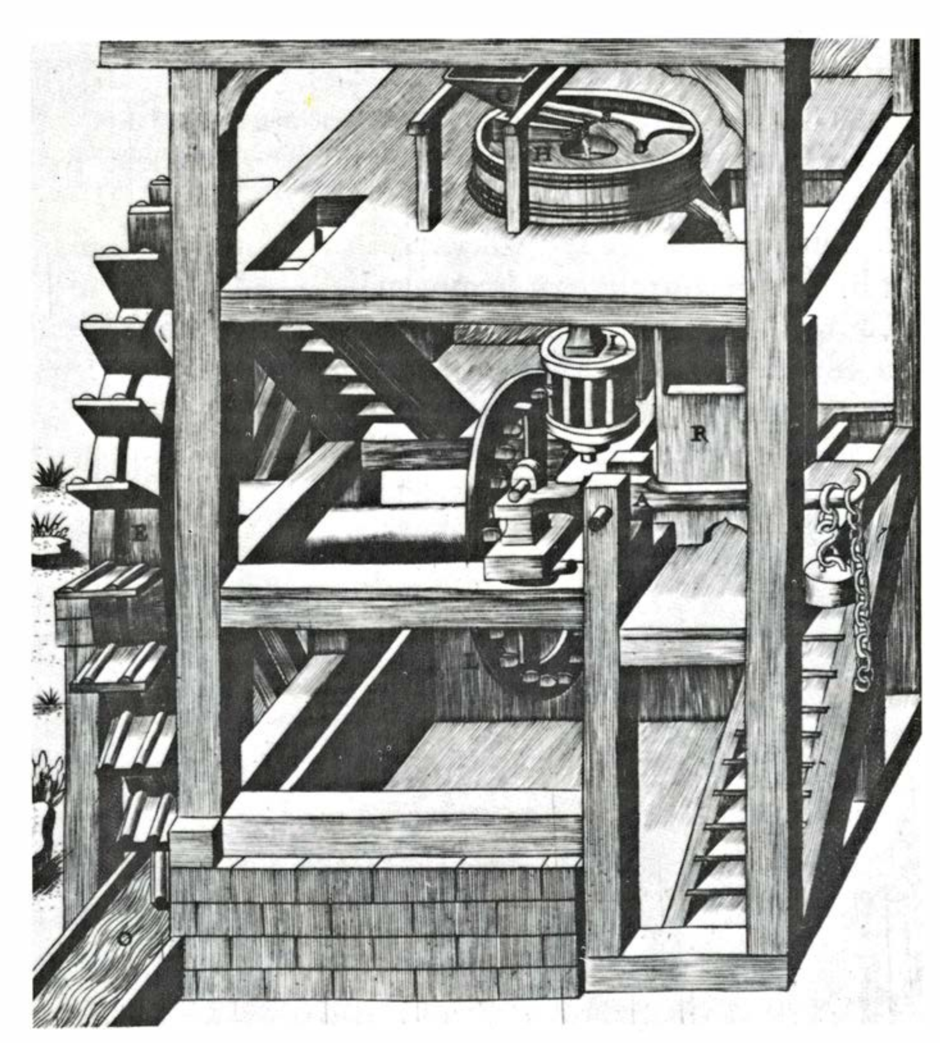
La alternativa de la leva en la transformación del movimiento de rotación en lineal era la biela (o cigüeñal). Conocida en China en el siglo ii d. C., apareció en Europa algo más tarde. Puede que las bielas se usaran para mover piedras de molino a mano a finales de la época clásica, pero no aparecen desarrolladas en Europa hasta el siglo ix; el salterio de Utrecht representa una biela sujeta a una piedra de moler accionada a mano. A finales del medievo la biela se combinó con la rueda hidráulica y empezó a sustituir a la leva en algunas tareas. La doble acción proporcionada por la biela era más ventajosa en las bombas hidráulicas, serrerías y fuelles que la acción simple de la leva. La biela se combinó también con los agarradores manuales y las hileras en los molinos de trefilado que surgieron en los siglos xiv y xv.

Antes de terminar el siglo xvi europeo, no menos de 40 procesos industriales diferentes habían pasado a depender de la energía hidráulica. La tendencia se mantuvo en los siglos posteriores. Por ejemplo, se aplicó energía hidráulica al hilado de la seda entre 1300 y 1600. En las sederías, unos husos hidráulicos enrollaban las fibras de seda a la hebra. En 1700 había 100 sederías sólo en el noreste de Italia. La gran sedería levantada por Thomas Lombe a principios de 1700 en Derby, Inglaterra, impulsada por el río Derwent, ocupaba una estructura de varios pisos y empleaba a 300 personas.

Entre 1550 y 1750 la energía hidráulica extendió su aplicación a otros procesos. Se utilizó para perforar ánimas en los cañones y mosquetes, para desespigar grano (con desgranadores giratorios), para agitar mezclas de mineral y agua y para pulverizar las materias primas en vidriería. Las piedras de rodillo se aplicaron a nuevas actividades, como la preparación de rapé, cemento, greda y pólvora. En 1692 había 22 fábricas de pólvora en Francia, número compara-



9. LOS MOLINOS DE RODILLO diferían de los empleados para obtener harina en que la piedra superior giraba sobre la solera, en lugar de friccionar contra ella. Introducidos en los siglos xi y xii, estos molinos se usaron para apisonar aceitunas en la extracción de aceite o para prensar caña de azúcar en la extracción de azúcar. La estampa es del *Novo teatro di machine*, de Vittorio Zonca, publicado en 1607.



10. UNA GRAN RUEDA DE ALIMENTACION INFERIOR impulsa dos mecanismos que transforman la rotación vertical en horizontal en esta imagen de Ramelli de un molino de harina del xvi. Las piedras de moler se colocaban en el piso superior de la construcción; la harina caía a un recipiente situado abajo.

ble al de fábricas textiles de Gran Bretaña a finales del siglo XVIII y principios del XIX. A mediados del siglo XVIII, se aplicaban martillos accionados por agua al triturado de huesos para fertilizantes y de yeso para lechadas; complejos sistemas de transmisión hidráulicos, bielas incluidas, habían mecanizado el pulido de cristales.

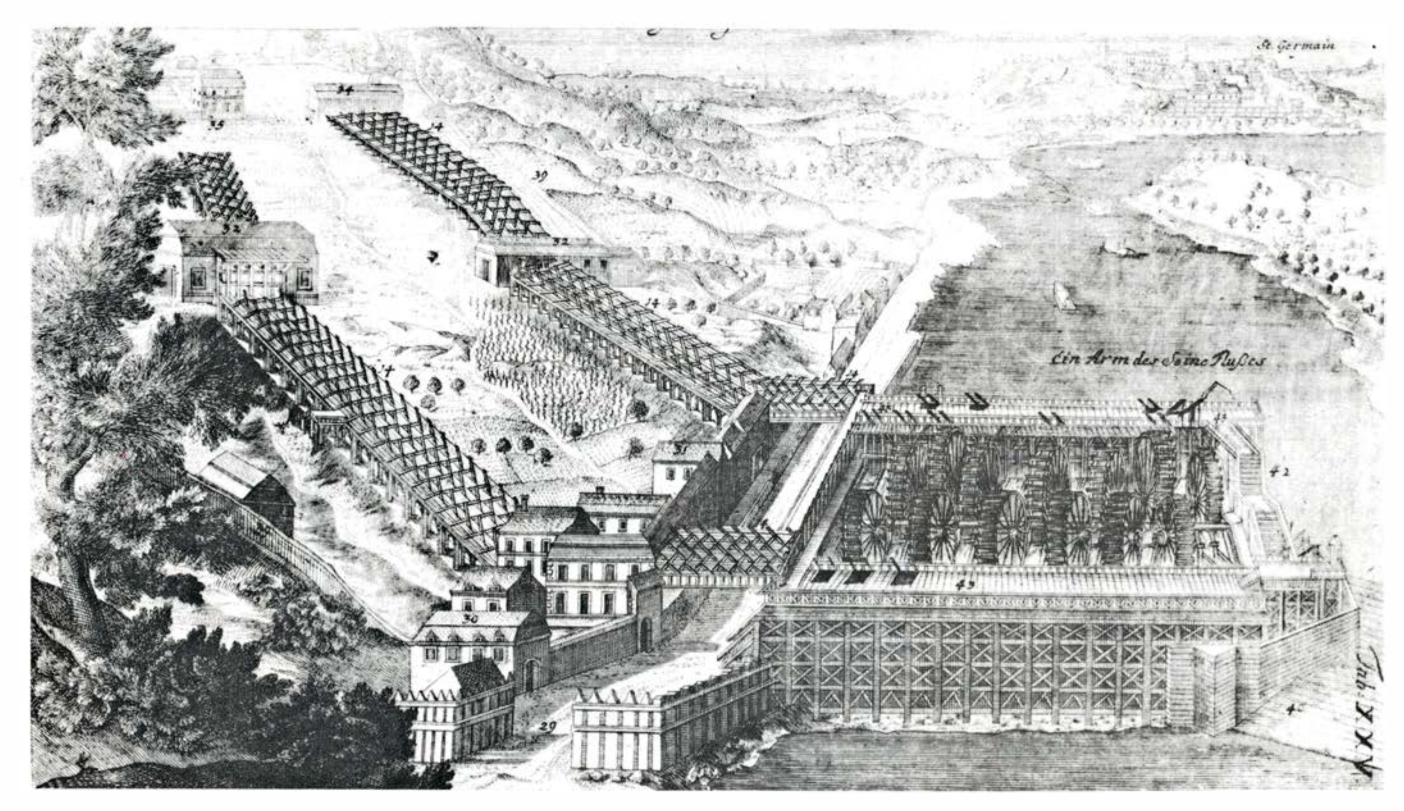
Igual que en el siglo XII mecanizó la industria del cáñamo, el martillo hidráulico penetró en la industria del lino en la primera mitad del XVIII. La fabricación de lino dependía por completo del trabajo manual. Una vez segada la planta de lino, los tallos se ponían en agua para su reblandecimiento. Se golpeaba luego para separar las fibras, que se enrollaban en hebras y con éstas se tejía el paño. Se lavaba el paño y después se golpeaba con mazas ligeras para endurecer el tejido y dar lustre al paño.

A finales del siglo XVII y principios del XVIII los técnicos europeos mecanizaron varios procesos de esos. Para separar las fibras de los tallos reblandecidos de la planta, los molinos hidráulicos de agramado utilizaban planchas de madera, en vez de palas de hélice. Los molinos de lavado de lino aplicaban la combinación de rueda hidráulica y leva o biela para mover las tablas de lavado, de madera ondulada, hacia las que se empujaba el lino mojado. Después, unas mazas accionadas por el agua endurecían y daban lustre al paño de lino mientras se arrastraba sobre grandes rodillos de madera. Sólo en Irlanda del Norte se establecieron más de 200 fábricas de lino hidráulicas entre 1700 y 1760.

Se acostumbra fechar los comienzos de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, con las primeras fábricas textiles de algodón inglesas. Es cierto que la energía hidráulica había mecanizado la industria no textil antes del decenio de 1770. Sin embargo, la energía hidráulica había afectado también a varios procesos de la producción de textiles, algodón aparte. Como hemos visto, el batanado de lana, el arrollamiento de la seda y varias etapas de la producción de lino se habían transferido a la maquinaria hidráulica bastante antes de 1770.

Por tanto, las fábricas de algodón textil de finales del siglo XVIII no fueron las únicas en sustituir el trabajo manual por la maquinaria. Ni tampoco en concentrar gran cantidad de potencia en un solo lugar. La mayoría de las primeras fábricas de algodón que se mecanizaron disponían de una potencia de 10 a 20 caballos de vapor. La sustitución, en estas fábricas, de la energía hidráulica por la de vapor, a principios de la década de 1790, no tuvo en un comienzo gran repercusión, puesto que hasta bien entrado el siglo XIX la potencia media de las máquinas de vapor era inferior a los 20 caballos. Todavía en 1835 las fábricas de algodón mecanizadas no alcanzaban por término medio más de 35 caballos de vapor. Concentraciones de energía de este tenor no eran en absoluto desconocidas en las fábricas hidráulicas entre los siglos IX y mediados del XVIII.

No existen datos precisos de la potencia obtenida por las ruedas hidráulicas anteriores a 1700. Sin embargo, entre 1700 y 1800, antes de que las tradicionales ruedas de madera se sustituyeran por las de hierro, las turbinas de agua y las máquinas de vapor, fuentes muy dispersas proporcionan suficiente información para permitir un cálculo aproximado de la potencia obtenida por algunas de las ruedas tradicionales. He recogido datos de 40 ruedas, tanto de alimentación superior como inferior, dispersos en manuales de constructores de molinos, textos de ingeniería, enciclopedias y otras fuentes. Indican que la potencia media transmitida al eje rondaba los cinco o siete caballos de vapor. Por tanto, la concentración de tres o cuatro ruedas de tamaño medio en un solo lugar re-



11. GRUPO DE 14 RUEDAS de Marly-le-Roi, en el Sena, a 14 kilómetros al oeste de París, construido por el ingeniero Rennequin Sualem en el decenio 1680. Proporcionaba de 300 a 500 caballos de vapor en el eje, aunque sólo de 80 a 150 tras descontarse las pérdidas ocasionadas por las bombas y la transmisión. Las ruedas bombeaban agua hasta un acueducto a 153 metros por encima del río. El agua se llevaba a varios palacios del monarca, Luis XIV.

presentaría una concentración de potencia casi igual a la de las fábricas de algodón inglesas mecanizadas.

Aunque no eran corrientes, esas concentraciones sin duda existieron. Los monasterios proporcionan algunos ejemplos. La abadía de Corbie, cerca de Amiens, tenía, ya en el siglo IX, molinos con hasta seis ruedas. En el monasterio de Royamount, cerca de París, un túnel de dos metros y medio de diámetro y 32 de largo alimentaba ruedas hidráulicas independientes para el molino de grano, el curtido, el batanado y el trabajo del hierro. En 1136, la abadía de Clairvaux, junto a Troyes, contaba con ruedas para moler grano, abatanar paño y curtir pieles.

Concentraciones de potencia parecidas se daban por doquier. En el siglo XIV los molineros de París trabajaban con 13 molinos hidráulicos en el Puente Grande. Incluso antes, a finales del siglo XII, los molineros de Toulouse construyeron tres presas en el río Garona, la mayor de las cuales, la de Bazacle, medía 400 metros de longitud. Estas presas abastecían a 43 molinos hidráulicos horizontales. En el siglo XIII ya había surgido en Toulouse una división entre capital y trabajo característica de las primeras fábricas de algodón británicas: los molinos eran propiedad de inversionistas; los molineros eran empleados.

También puede encontrarse instalaciones hidráulicas complejas a principios de la Europa moderna. Por ejemplo, en la década de 1680, el ingeniero flamenco Rennequin Sualem diseñó y construyó para Luis XIV un complejo hidráulico en Marly-le-Roi, en el Sena. Una presa desviaba agua hacia un conjunto de 14 ruedas de alimentación inferior, de 11 metros de diámetro y 2,3 de ancho cada una. Por medio de un complejo sistema acoplado de manivelas, balancines y bielas, las ruedas movían 221 bombas en tres niveles, que elevaban el agua del río a 153 metros, hasta un acueducto situado a un kilómetro. Sin embargo, el sistema de transmisión era tan imponente cuan ineficaz: las 14 ruedas sólo proporcionaban 150 caballos de vapor.

Casi contemporáneo a la obra de Marly fue el molino Grand Rive, una fábrica de papel de la región de Auvergne, dotada de siete ruedas hidráulicas y 38 grupos de martillos. En el decenio de 1720, ingenieros rusos construyeron una gran presa en Ekaterimburgo, en los Urales. El complejo industrial que impulsaba el agua de la presa constaba de 50 ruedas hidráulicas, que movían 22 martillos, 107 fuelles y 10 molinos de trefilado. En 1760, la Real Fábrica de Pólvora británica de Faversham, Kent, tenía 11 ruedas hidráulicas. Por esa época los ingenieros de Cornualles construyeron lo que se conoció como la torre mecánica: constaba de 10 ruedas de alimentación superior, colocadas una encima de la otra, unidas por bielas a dos grandes bombas de mina.

Algunas concentraciones de potencia anteriores a 1800 alcanzaron una escala regional. Por ejemplo, alrededor de 1550, en la región alemana del Harz, los ingenieros de minas emprendieron la construcción de una compleja red de presas, embalses y canales para mover ruedas que impulsaran bombas, máquinas de trefilar, plantas de lavado de mineral, molinos de triturado de mineral y fuelles de hornos y forjas. En 1800, el sistema tenía 60 presas y embalses, todos en un radio de cuatro kilómetros alrededor de Clausthal, centro del distrito minero. La mayor presa del sistema, la de mampostería de Oderteich, construida entre 1714 y 1721, medía 145 metros de largo, 18 de alto y 47 de ancho en la base. Las presas llegaron a alimentar 225 ruedas a través de una red de canales de 190 kilómetros. La potencia total del sistema superaba los 1000 caballos de vapor.

La energía hidráulica llegó también al Nuevo Mundo. Cerca de Potosí, en los Andes bolivianos, los ingenieros españoles encargados de la explotación de los ricos depósitos de plata empezaron a construir en 1573 un sistema de presas, embalses y canales para llevar agua a los molinos de triturado de mineral. En 1621 el sistema tenía 32 presas. Un canal principal de 5 kilómetros de largo alimentaba 132 molinos de triturado próximos a la ciudad. El sistema generaba más de 600 caballos de vapor.

Parece, por tanto, que la mecanización de las fábricas de algodón de Inglaterra no representó una ruptura radical con el pasado, ni en la sustitución del trabajo manual por las máquinas ni en la concentración de grandes cantidades de potencia. La sustitución de la maquinaria hidráulica por la fuerza manual y la concentración de industrias hidráulicas estaban bien encaminadas antes de esa época. Las fábricas textiles británicas constituyeron, simplemente, la culminación de un proceso evolutivo con orígenes en la Europa medieval, e incluso en el Mediterráneo clásico.

Juegos de ordenador

Los programas que juegan a las damas nos llevan muchas veces un salto de ventaja

A. K. Dewdney

"¿Será posible preparar un programa de ordenador capaz de jugar a las damas tan bien que nunca, nunca, pueda perder frente a una persona?" El niño no tenía arriba de diez años, y alzó la mirada desde la terminal con esa expresión de inocente sabiduría que solamente los muy jóvenes pueden tener. El niño estaba jugando a las damas contra un programa redactado por algunos de mis alumnos. Habíamos ajustado en el programa la profundidad de análisis a un nivel moderado, y el chaval se defendía bastante bien.

La misma cuestión planteada por el muchacho fue formulada hace algunos años en una sesión abierta de nuestro departamento, y tiene diferentes respuestas, según el juego de damas de que se esté hablando. La cuestión incide también en temas yacentes en el corazón mismo de la inteligencia artificial, que es el estudio de la posibilidad de comportamientos inteligentes en programas de ordenador. Retornaré a este asunto algo más adelante.

En el momento de plantear su pregunta, el chiquillo estaba jugando a las damas en un tablero de 6 × 6, una de las infinitas posibilidades que presenta el juego de damas. Examinaremos aquí el juego sobre tableros de 4 × 4, 6 × 6 y 8 × 8 (ésta es la forma habitual) y compararemos qué perspectivas ofrecen los programas diseñados para jugar en cada caso. En general, podemos definir las damas de n-ésimo orden sobre escaqueados de $2n \times 2n$ casillas. En cada caso, los peones –así llamaremos a las piezas– ocupan todas las casillas negras, a excepción de las situadas sobre las dos hileras centrales del tablero. Las reglas de juego de orden n-ésimo se examinan con más detalle en el recuadro de la página 111.

Parece que en tableros de 4 × 4 la pregunta del chico tiene respuesta afirmativa. Para el juego de 6 × 6 tal respuesta se queda en "muy probablemente", y para el caso 8 × 8 sólo es de "seguramente". Las respuestas que ofrezco están basadas en una combinación de experiencia personal, lecturas y pura y simple conjetura.

Fijémonos en el juego de 4 × 4. Cada bando tiene solamente dos peones; raramente dura la partida más de 10 jugadas, al menos entre contrincantes algo avezados. Los novatos pueden llegar a 20 o más sin percatarse de que se encuentran en una posición de tablas. Y hablando de partidas terminadas en tablas, en un reciente torneo con tablero de 4 × 4 se produjeron seis empates seguidos. La séptima de las partidas, celebradas en Damenspielsburg, se la adjudicó el Gran Maestro Samuel Jensen Truscott, a causa de un tecnicismo: su adversario había, sin querer, tocado por dos veces una pieza imposible de jugar lícitamente.

En cualquier caso, el análisis de las damas 4 × 4 puede efectuarse a mano. El juego parece ser, ya de salida, un empate, por lo que un jugador razonablemente alerta no tiene por qué perder jamás. Lo mismo vale para un programa de ordenador razonablemente bien concebido.

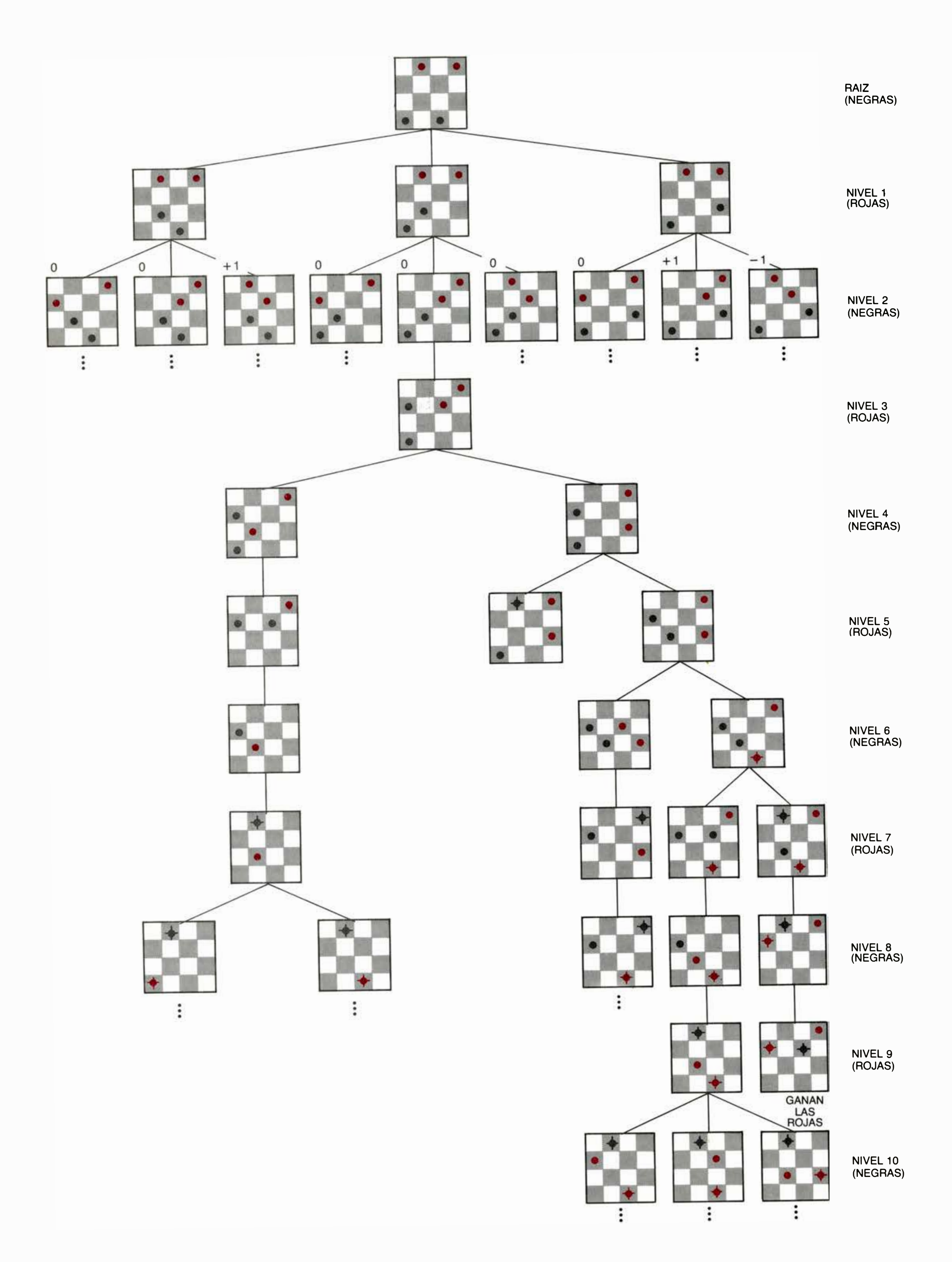
En el juego de 6 × 6 cada bando dispone de 6 peones; una partida típica viene a durar unas 20 jugadas. Cuando el programa de los alumnos se ajustó a su máxima capacidad de análisis, tardaba de cinco a diez minutos en decidir cuál sería su siguiente paso. Hasta la última de las partidas que jugó dio siempre la impresión de ser invencible, a esa profundidad de análisis. Por lo común, tan por delante iba en posición o material que terminaba por vencer, o por empatar, cuando menos. Ocasionalmente, empero, alguno de nosotros conseguía mantener en el tablero un número suficiente de piezas para vencer al programa en la fase final del juego, donde su actuación era sorprendentemente floja.

En el damero de 8 × 8, el juego tiene 12 piezas por bando; las partidas entre jugadores expertos pueden durar 30 o más jugadas. Es hoy práctica normal en torneos y campeonatos que las jugadas de apertura se saquen a la suerte. Tal práctica fue adoptada en Inglaterra, hacia la vuelta del siglo, debido a la querencia de los jugadores maestros a ceñirse a sus aperturas favoritas y desarrollar líneas de juego bien estudiadas, lo que conllevaba una proporción cada vez mayor de partidas empatadas. Es difícil decir si la causa de que tan frecuentes sean los finales en tablas es una característica intrínseca del juego, o si se debe al conservadurismo de los jugadores expertos. En cualquier caso, el juego de damas en tablero de 8 × 8 sigue siendo tan difícil como fascinante. Desde el punto de vista matemático es algo menos complejo que el ajedrez, aunque expertos hay en ambos juegos que en modo alguno consideran "superior" al ajedrez.

De los programas ideados para jugar a las damas, los dos más afamados son el puesto a punto por Arthur L. Samuel, de IBM, hará algo más de veinte años, y el ideado, en 1977, por Eric C. Jensen y Tom R. Truscott, de la Universidad de Duke. En 1962, el programa de Samuel venció a Robert Nealey, antiguo campeón del estado de Connecticut. A pesar de que el juego que este programa desarrolla es muy fuerte, al parecer no está conceptuado como experto. El programa de Jensen y Truscott es todavía más potente, y puede figurar entre los mejores jugadores del mundo.

En 1979, el programa de Jensen-Truscott se enfrentó a Elbert Lowder, quien es comúnmente reconocido como uno de los mejores jugadores de damas de los Estados Unidos. De cinco partidas, el programa hizo tablas en dos, ganó una vez y perdió en dos ocasiones. Las partidas perdidas parecían deberse a fallos de la fase final del juego: cuando Lowder se dio cuenta de que dos de los peones del programa quedaban reservados, de guardia, en la última hilera, sacó ventaja de esta debilidad y venció en los dos últimos juegos. Es preciso añadir que la actitud de Lowder mientras jugaba contra el programa Jensen-Truscott fue experimental y un tanto deportiva. Su única pérdida fue consecuencia de una tentativa para llevar al programa hacia posiciones heterodoxas –lo cual seguramente no deba intentarse con programas de tanto calibre.

Entre tanto, Marion F. Tinsley, la campeona mundial del juego de damas, observa divertida desde su casa de Tallahassee, en Florida. Ignoro si Tinsley se ha enfrentado alguna vez a uno de estos excelentes programas de juego. Por otra parte, los dos principales programas ya se han enfrentado entre sí. En las dos partidas jugadas, el programa de Jensen-Truscott resultó "tre-



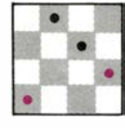
Arbol de juego de las damas 4 × 4, completo hasta el segundo turno, que muestra ciertas continuaciones seleccionadas

mendamente superior" al de Samuel –son palabras de Truscott– y ganó en ambas.

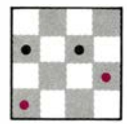
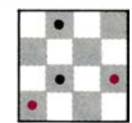
Prácticamente todos los programas que alcanzan a jugar con buen éxito constan de tres partes principales: un generador de jugadas, una función de evaluación del tablero y un procedimiento minimax. Otro elemento de importancia central es el árbol de juego. El árbol de juego interviene en los tres segmentos del programa. El generador de jugadas desarrolla el árbol; el evaluador de tablero se consulta al extremo de cada rama del árbol y el procedimiento minimax se aplica al árbol en su totalidad.

El árbol de juego tiene en su raíz el tablero inicial, y cada rama representa una posición del tablero alcanzable efectuando una única jugada. Curiosamente, el árbol suele dibujarse en posición invertida, con la raíz en lo alto. El árbol puede organizarse en niveles; al hacerlo así, los tableros del *n*-ésimo nivel representan la totalidad de posibles jugadas de uno de los bandos en el *n*-ésimo turno. Aunque por lo general los árboles de juego no son muy altos (o profundos), sí pueden ser muy frondosos; como regla, el número de tableros de cada nivel es el doble o más del número de los correspondientes al nivel precedente. Aun cuando cada tablero tuviera solamente dos sucesores, pronto el número de ramas crecería hasta valores imposibles de manejar. Un árbol que se ramificara de este modo 64 veces consecutivas tendría más ramas que todos los árboles del mundo conjuntamente. (En la naturaleza, los árboles no se ramifican arriba de una docena de veces desde el tronco hasta las hojas.) El explosivo crecimiento exponencial del árbol de juego hace imposible que un ordenador pueda analizar más que una minúscula fracción de las posibles continuaciones en juegos como las damas de 8 × 8.

El árbol de juego de las damas lo crea el generador de movimientos, programa que recibe como dato de entrada un estado particular del tablero, junto con la indicación de qué jugador está de turno. La salida del generador de jugadas es una lista de todos los tableros alcanzables, desde la posición dada, por una jugada lícita. Tomemos el siguiente tablero de 4 × 4, suponiendo que sea el turno de las negras:



Las negras tienen dos jugadas posibles, y por tanto el generador de jugadas entrega los dos tableros siguientes:

El generador de jugadas puede, seguidamente, aplicarse por turno a estos dos tableros.

Aquellos lectores que gusten de explorar el funcionamiento de un generador de jugadas están invitados a desarrollar el árbol del damero de 4 × 4, en sentido descendente, a partir de este nivel. En el nivel siguiente, por ejemplo, tan sólo hay dos tableros, porque en cada caso las reglas obligan a las rojas a capturar una pieza. En el nivel inferior siguiente a ése hay de nuevo dos tableros; después, tres (uno de ellos, victoria para las rojas); después, dos; después, cinco; después, 10, y después, 24. A quienes deseen profundizar todavía más se les recomienda ajustarse a dos principios. Primero, inspeccionar en cada nivel si existen tableros repetidos y desarrollar el árbol en sentido ascendente, para averiguar si tal posición se ha dado anteriormente. De ser así, dar por finalizada esa rama, y rotularla "tablas".

¿Y cómo opera un programa generador de jugadas? La primera cuestión a atender es la de cómo habrá de representarse el tablero. El esquema más sencillo consiste en una matriz o tabla numérica bidimensional, cuyos elementos sirven para reconocer las piezas que ocupan las casillas. Un escaque vacío podría, por ejemplo, representarse por un 0; una casilla ocupada por un peón, por un 1; y una ocupada por una dama, por un 2. El signo del número podría denotar el bando a que pertenece la pieza; digamos que positivo para las negras y negativo para las rojas. El primero de los tableros de 4 × 4 arriba mostrados quedaría entonces codificado en la matriz:

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \end{matrix}$$

Los movimientos lícitos de cada pieza dependen de su color y posición, y de si los cuadrados diagonalmente adyacentes se encuentran ocupados o libres. En el caso que nos interesa, el generador de jugadas va inspeccionando la tabla fila por fila, hasta encontrar el número positivo (pieza negra) de la fila 3, columna 2; posición que designaremos (3,2). Puesto que las negras están de turno y la pieza es un peón (magnitud 1) y no una dama, el generador de jugadas examina las casillas (2,1) y (2,3). La casilla (2,1) está ya ocupada por una pieza (sobre la que es imposible saltar), pero (2,3) está libre. Consiguientemente, el programa escribe una nueva tabla, con el +1 situado en la casilla (2,3) y eliminando el de la casilla (3,2):

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \end{matrix}$$

El generador de jugadas prosigue su inspección de la tabla hasta hallar el siguiente elemento positivo.

Para llevar control de los tableros y de sus correspondientes matrices, podemos irlos numerando correlativamente conforme se van generando. Para especificar una casilla cualquiera de un tablero cualquiera bastará dar el número de tablero y la fila y columna de la casilla. Al tiempo que el generador de jugadas construye un árbol de juego tiene que llevar registro de las conexiones entre los tableros. Cuando el programa se dispone a decidir una jugada, inspecciona en sentido descendente el árbol de juego, profundizando cierto número de niveles, después sube, vuelve a descender, y así sucesivamente. Para recorrer el árbol de este modo, el programa ha de identificar tanto al "padre" de un tablero como a la "progenie" de éste. Con tal finalidad, el tablero mantiene una matriz adicional, la llamada tabla de indicadores. El indicador de cada tablero es una lista de números; el primero señala el progenitor del tablero de que se trate, y los siguientes, su progenie.

El siguiente de los componentes principales de que consta el programa de juego, la función de evaluación del tablero, recibe como entrada un tablero, y a partir de él calcula un número que refleja el valor que para el bando negro tiene ese tablero. Un número alto significa que si llegara a alcanzarse tal posición en el desarrollo actual del juego, seguramente las negras ganarían la partida. El diseño de una buena función de evaluación del tablero es difícil, porque en el juicio acerca de una situación intervienen muchos factores. En casi todos los juegos, rara es la vez en que está clara la importancia que debe atribuirse a los diversos factores. He aquí una lista breve de factores relativamente primitivos:

PEONES: Se añade un 1 por cada peón negro del tablero; se resta 1 por cada peón rojo.

DAMAS: Se añade 1 por cada dama negra presente en el tablero; se resta 1 por cada dama roja.

CENTRO: Se añade 1 por cada uno de los cuatro escaques centrales que esté ocupado por pieza negra; se resta 1 por cada uno ocupado por pieza roja.

PROGRESIÓN: Se suma 1 por cada peón negro situado en la segunda hilera; 2, por cada peón negro de la tercera; y 3 por cada peón que haya alcanzado la cuarta (que se corona y convierte en dama). Para las piezas rojas, en lugar de sumar, se restan los correspondientes valores.

MOVILIDAD: Cada una de las jugadas posibles para las negras puntúa 1; por cada jugada válida de las rojas debe restarse 1.

¿Qué importancia relativa asignar a estos factores? ¿Deberíamos ponderar doble el valor de DAMAS que el de PEONES? ¿No contiene la variable PROGRESIÓN la información disponible en DAMAS y PEONES?

Samuel respondió a estas preguntas dejando que fuera su propio programa quien determinase la ponderación que debía atribuirse a cada factor, basándose en su propia experiencia de juego. La función de evaluación de Samuel, que tomaba en consideración un total de 39 factores (muchos de ellos sugeridos por libros y jugadores expertos) comenzaba dando inicialmente a todos idéntica ponderación, limitándose a sumar todos los números para calcular el valor del tablero. El programa analizaba cada partida perdida, y aislaba el factor conducente a la jugada fatal. A continuación reducía el peso de tal factor. Para acelerarlo, se automatizó el proceso, y se hacía jugar cierto número de veces al programa contra sí mismo.

Los procedimientos de evaluación del tablero jamás son perfectos. Si lo fueran apenas si los otros componentes de los programas de juego serían necesarios: el programa no tendría necesidad sino de examinar los diversos tableros situados una jugada por delante, evaluar cada uno de ellos y elegir la mejor jugada. Hay una especie de componenda o transacción a realizar entre el número de niveles que el programa tiene que inspeccionar y la exactitud de la función de evaluación. Si la función de evaluación apenas es capaz de más que reconocer que en una posición se ha alcanzado una victoria, o sufrido una derrota, ¡el árbol de juego tendría que examinarse exhaustivamente hasta tocar fondo!

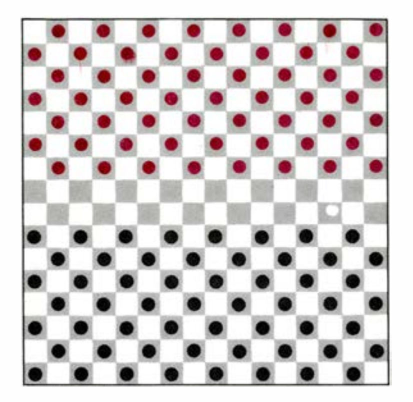
El tercero de los principales componentes de un programa de juego es el algoritmo minimax, que en esencia consiste en un programa de exploración del árbol que se vale de las puntuaciones asignadas a los tableros del más bajo nivel inspeccionado para atribuir puntuaciones a tableros situados en niveles superiores del árbol. En cierto punto de la búsqueda, la función de evaluación habrá de valorar todos los tableros de un determinado nivel. Los tableros *B* situados en el nivel inmediatamente precedente reciben un valor de acuerdo con la siguiente regla, muy sencilla: si en *B* es turno de jugar las rojas, se toman como valor de *B* el mínimo de los asignados a los tableros de su progenie; en cambio, si son las negras las de turno, el valor seleccionado deberá ser el máximo.

Debería estar claro el razonamiento en que se funda esta regla. Si le toca mover a las rojas, el bando negro puede perfectamente suponer que las rojas elegirán una jugada que haga mínimo para las negras el valor del tablero resultante. Por igual razón, si el turno es el de las negras, optarán éstas por el tablero de máximo valor. El procedimiento minimax parte, consiguientemente, del más profundo nivel que se esté examinando en el árbol, evalúa todos los tableros situados en ese nivel y lleva después los valores en sentido ascendente, de retorno, por el árbol. En los pasos de uno a otro nivel, el algoritmo va alternativamente seleccionando valores máximos y mínimos, dependiendo del bando que en ese nivel esté de turno. Finalmente, termina por retornar al tablero actual, presentando a las negras un valor para cada una de sus posibles jugadas. Como es obvio, las negras eligen la de máximo valor.

Un programa capaz de jugar a las damas consta de más componentes que los ya citados. Tiene que interactuar con un jugador humano, aceptar jugadas que le llegan de un teclado e imprimir los movimientos que en cada caso opta por hacer. Puede, además, presentar una imagen del estado actual del tablero, mostrando mediante símbolos los dos bandos y sus piezas. En muchos casos, el programa consiente también al humano seleccionar el "nivel de destreza" con que el programa ha de jugar. Tal nivel es por lo general un número que refleja el alcance de la prospección del programa, es decir, el número de niveles que el programa ha de examinar en el árbol de juego, a partir de su posición actual.

Cuando la profundidad a que el programa debe llevar su análisis es grande, el tiempo que tarda en mover va inva-

Reglas del juego de damas de orden *n*-ésimo



El tablero es un escaqueado de $2n \times 2n$ casillas, de color alternativamente claro y oscuro. Los jugadores se sitúan en lados opuestos del tablero; disponen de n^2-n peones, formados sobre las casillas oscuras. Las dos hileras centrales están inicialmente vacías. Las negras abren el juego.

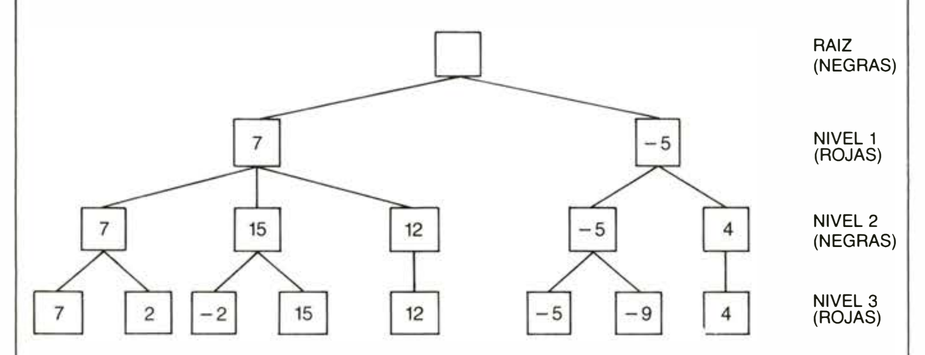
En cada turno, uno de los peones ha de avanzar diagonalmente hasta una casilla adyacente inmediata vacía, y ocuparla. Si una tal casilla está ocupada por una pieza enemiga, pero está libre el cuadro situado al otro lado, la pieza propia puede saltar sobre la enemiga, que queda capturada y se retira del tablero. Siempre que una captura es posible, es obligatoria; de varias, es preciso optar por una. Si tras haber realizado una captura la pieza tiene oportunidad de efectuar otra, tiene que hacerla.

Cuando una pieza consigue alcanzar la última hilera se corona y se transforma en dama. Las damas pueden trasladarse hacia delante y atrás (siempre en diagonal) y capturar en ambas direcciones.

La partida termina en victoria de un jugador cuando el otro queda impedido de mover lícitamente, bien porque todas sus piezas hayan sido capturadas, o porque hayan quedado inmovilizadas. Si la victoria es imposible, el juego se declara empatado.

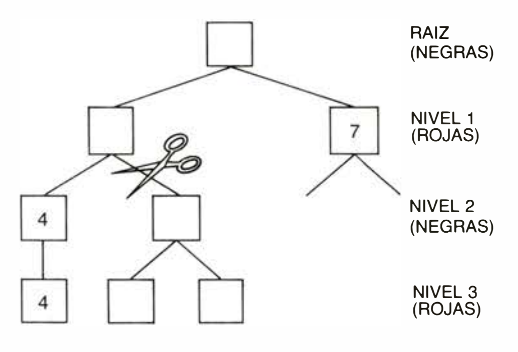
El tablero presentado arriba muestra la posición inicial de una partida de octavo orden, que se juega sobre tablero de 16 por 16, con 56 piezas por bando.

El algoritmo minimax y la poda del árbol de juego



El procedimiento minimax se aplica al árbol de juego una vez generadas todas las jugadas lícitas, hasta una profundidad prefijada, y después de que la función de evaluación del tablero haya estimado el valor de la posición alcanzada en el extremo de cada rama. Aquí les toca jugar a las negras; el árbol se ha explorado hasta una profundidad de tres niveles; la función evaluadora le ha asignado a cada tablero terminal un entero que refleja cuál sería su valor para las negras. La tarea encomendada al procedimiento minimax consiste en seleccionar para las negras una jugada, basándose en estos valores.

Observemos que la secuencia de jugadas más favorable para las negras pasa por las cajas rotuladas 7, 15 y 15. Las rojas, por su parte, preferirían la sucesión −5, −5 y −9. El algoritmo minimax toma en consideración estas contradictorias preferencias. El programa comienza, primero, por examinar todas las jugadas de nivel 3 que sean "progenie" de una jugada "materna" dada, de nivel 2. Puesto que en el nivel 2 les toca jugar a las negras, se asigna a la jugada "progenitora" el valor de la hija con máxima puntuación. El mismo procedimiento se aplica a continuación para asignar valores a los tableros del nivel 1, pero dado que se trata del turno de las rojas, se eligen ahora los valores mínimos. Si ambos jugadores evaluasen los tableros por idéntico procedimiento, el juego discurriría por los nodos marcados 7, 7 y 7.



Los árboles de exploración cuya profundidad exceda de unos pocos niveles pueden ser enormes; la única forma de efectuar en ellos una búsqueda suficientemente profunda es podarlos. Aquí es el turno de las negras; una búsqueda parcial ha dado ya un valor 7 a una de las opciones disponibles para las negras en el nivel 1. Al investigar otra elección, el programa ha descubierto que una de las posibles respuestas de nivel 2 tiene valor 4. Se deduce que no hay motivo razonable para explorar el resto del árbol. Dado que las rojas elegirán la jugada de valor mínimo para las negras, la opción de las negras a nivel 1 no puede tener valor mayor que 4. Por consiguiente, es preferible la jugada con valor asignado de 7. La supresión de caminos que las negras puedan despreciar se llama "poda de tipo alfa"; el correspondiente proceso para las rojas se llama "poda beta".

riablemente creciendo; cada nivel adicional en el árbol puede duplicar de lejos el tiempo requerido. Para reducir la búsqueda que el programa debe efectuar, el algoritmo minimax puede incorporar una perspicaz idea llamada "poda alfa-beta". La poda alfa-beta puede efectuarse prácticamente en todos los niveles del árbol; permite eliminar una tremenda cantidad de exploración y evaluación innecesarias.

El algoritmo del juego de damas no resulta demasiado difícil de programar. Más todavía, en opinión de Truscott, no hay necesidad de disponer de ordenadores grandes y potentes para competir con eficacia. "Los microprocesadores sirven perfectamente para preparar y poner a punto programas de juego de damas", escribe Truscott, "y con toda probabilidad, los aficionados harán aportaciones importantes a este campo, desafiante, remunerador y totalmente abierto".

A los lectores con cierta experiencia en programación la reseña anterior les resultará sin duda suficiente para diseñar y redactar programas de juego. Tal vez otros lectores no estén tan seguros de cómo proceder. Proyectar y construir un generador de jugadas y una función de evaluación de cada tablero es razonablemente sencillo. En cambio, el algoritmo minimax puede requerir un análisis más minucioso. ¿Cómo hace un programa para subir y bajar por el árbol de juego, para recordar dónde ha estado ya y a dónde debe ir a continuación? En el recuadro de la página adyacente se dan indicaciones de cómo recorrer el árbol.

Una vez diseñado, redactado y depurado el programa, lo que suele suceder es que al hacerlo funcionar con un factor de prospección elevado sus limitaciones queden al descubierto. Puede que tarde demasiado en decidir sus jugadas; tal vez la cantidad de espacio necesario para almacenar el árbol de juego exceda la memoria disponible. Hay muchos trucos para reducir los tiempos y los volúmenes de memoria requeridos. Por ejemplo, hemos representado aquí cada damero mediante una tabla bidimensional, en la cual, invariablemente, la mitad de sus elementos (los correspondientes a casillas blancas) son ceros. El tablero puede transformarse en una matriz unidimensional, donde se eliminan los espacios vacíos. Al hacerlo así, no obstante, la regla para generar jugadas se complica.

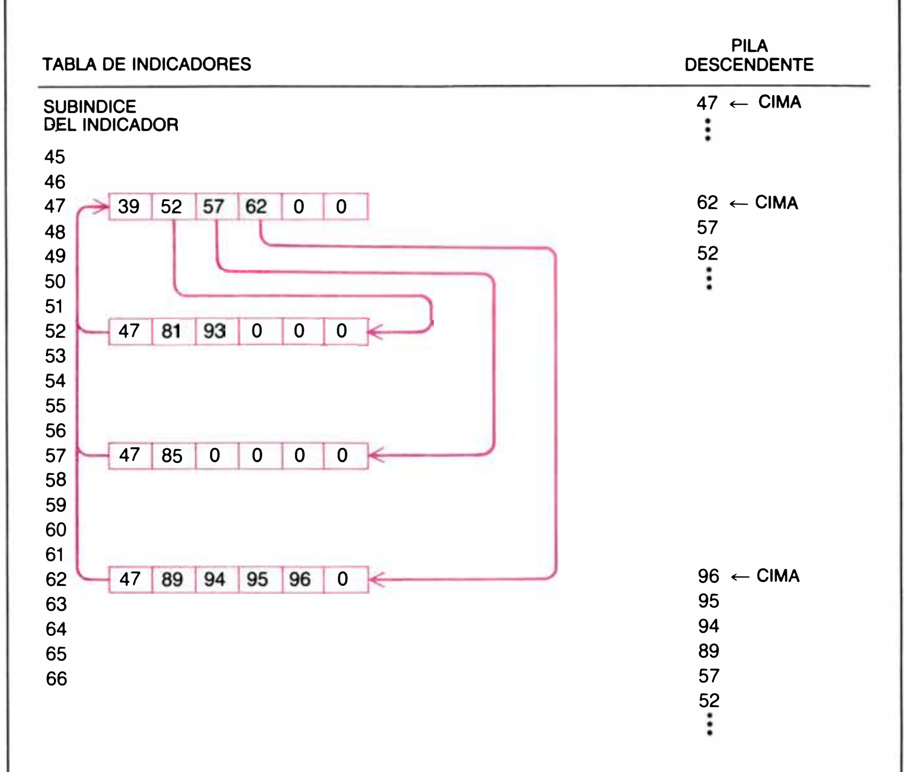
La cuestión de si es posible preparar un programa que juegue a las damas sin que jamás pueda perder frente a un jugador humano se reduce a

una cuestión concerniente a la naturaleza misma del juego. ¿Existe para el juego de orden n-ésimo alguna estrategia mediante la cual puedan las negras vencer siempre? ¿Pueden siempre las rojas forzar unas tablas? El análisis manual del juego de n-ésimo orden tan sólo es posible cuando n es 2. El autor ha analizado el juego de 4 × 4, desarrollando el árbol correspondiente hasta una profundidad media de 10 jugadas. En este nivel se presentan unas cuantas posiciones victoriosas para las negras y un número igualmente reducido de derrotas. Todas las restantes posiciones parecen corresponder a empates, donde damas coronadas se persiguen interminablemente una a otra en torno a los estrechos cuarteles del tablero de 4 × 4. No he llegado a confirmar que en todos los casos se produzca el empate, pero si mis evaluaciones son correctas, el procedimiento minimax le da al tablero inicial el valor de cero, esto es, tablas.

¿Serán las damas de 6 × 6 forzosamente empates? Al enfrentar contra sí mismo el programa escrito por mis alumnos con un factor de prospección grande, raramente la partida llegaba a conclusión. Con sólo esta base, podríamos sentirmos tentados a conjeturar que las damas de 6 × 6 son, de salida, tablas. Naturalmente, si resultase que los juegos de 4 × 4 y 6 × 6 pueden todos hacerse terminar en tablas, la sombra de igual sospecha recaería, ominosa, sobre las damas de tablero de 8 × 8. Tal vez algún lector tenga la rara combinación de habilidad y osadía de redactar un analizador para el árbol de juego del tablero de 6 × 6. El proyecto linda en los límites de lo realizable en un gran ordenador.

Hay en teoría de computabilidad algunos interesantes resultados concernientes a las damas de n-ésimo orden. Resulta que el siguiente problema es computacionalmente intratable: "Dada una colocación lícita de piezas rojas y negras, sobre un tablero de $2n \times 2n$, decidir si las negras tienen modo seguro de vencer". En 1978, Ariezri Fraenkel, del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, y Michael R. Garey y David Johnson, de AT & T Bell Laboratories, demostraron que el problema era "P-espacio difícil". Un problema "P-espacio difícil" es todavía peor que un NP-completo; la mayoría de los especialistas en computabilidad estiman como muy improbable que los problemas clasificados como NP-completos admitan solución general prácticamente realizable. Tal descubrimiento conlleva que si un programa alcanzase a jugar a las damas de orden n-ésimo con

Recorrido del árbol de juego



Cuando el programa de damas se dispone a seleccionar una jugada ha de explorar el árbol de juego hasta una profundidad prefijada, visitando cada rama, exactamente una vez. Un método sencillo de recorrer el árbol consiste en una tabla de indicadores, que registran las relaciones entre las ramas, y de una estructura de datos llamada "pila descendente" que tiene encomendada la supervisión de la posición actual del programa en el árbol, y que mantiene la lista de las ramas por visitar.

Conforme van generándose nuevos tableros se les asigna un número, que sirve de subíndice en la tabla de indicadores. A su vez, el indicador asociado con un tablero constituye también una lista de números de tableros. El primer número de esa lista corresponde al progenitor del tablero; todos los demás números denotan su progenie. Suponiendo que el programa haya llegado al tablero número 47, el contenido del indicador señala que la búsqueda debería proseguir con los tableros 52, 57 y 62. Si el programa se encuentra en el tablero 62 y ha de retornar al progenitor, la primera componente del indicador lo encamina de regreso al tablero 47.

Es función de la pila descendente ir llevando control de la progresión del programa por entre la tabla de indicadores. La propia pila puede crearse definiendo una matriz, llamada PILA, y una variable, llamada CIMA, que contiene la dirección del elemento situado en lo más alto de la pila. Cada vez que se añade o inserta en la pila un elemento, o cada vez que se elimina uno de ella, CIMA crece o decrece.

El elemento que ocupa la cima de la pila es el número del tablero que se ha de examinar a continuación. Si el elemento cimero es 47, el algoritmo de recorrido del árbol expulsa de la pila tal elemento, y seguidamente examina la lista contenida en el indicador, buscando el tablero 47. Se desprecia el primer número de tal lista (el progenitor del tablero 47), pero los restantes elementos no nulos se arrojan sobre la pila, ajustándose en consecuencia el valor de CIMA. Por tanto, se selecciona para examinarlo a continuación el tablero número 62.

Cada vez que el programa alcanza un tablero situado a la máxima profundidad permitida, se reclama de la función de evaluación que lo puntúe. El algoritmo minimax puede entonces consultar la lista contenida en el indicador para hallar el progenitor del tablero y asignarle un valor máximo o mínimo provisional. En posteriores visitas a tableros gemelos el procedimiento tendrá oportunidad de revisar tal valor.

absoluta perfección, el tiempo medio que invertiría en generar una jugada crecería más rápidamente que cualquier función de carácter potencial de la dimensión *n*.

Un programa capaz de jugar sin jamás perder una partida tendría que estar respaldado por una enorme potencia de cómputo. Aunque las damas fuesen inherentemente un juego empatado, un programa capaz de conseguir tablas tendría un factor de prospección considerablemente grande, a igualdad de los restantes elementos. Del programa que Jensen y él prepararon, escribe Truscott: "Con un tiempo medio de 5 segundos por jugada (en un ordenador IBM 370/165), el programa es apenas capaz de vencer a sus autores. Concediéndole 20 segundos, el programa seguramente ocupase el centésimo puesto entre los más fuertes jugadores de los Estados Unidos. Con tiempos medios de 80 segundos por jugada, el programa seguramente llegase a clasificarse en décimo lugar entre todos los jugadores del mundo".

A veces se siente cierta desilución al leer la descripción de un programa de juego, que deja al desnudo sus más íntimas operaciones. Cuando nuestro adversario de juego es un programa del que nada sabemos, resulta bastante fácil imputarle una maravillosa fuerza intelectual que, como es obvio, no posee. Es una fantasía que a muchas personas les agrada. No podemos sino confiar en que la decepción que sufran al perderla quede compensada por el gozo de la comprensión de la estructura y funcionamiento de esos programas.

El chaval había preguntado si es posible redactar un programa de damas al que jamás un humano pudiera vencer. Tal cuestión incide en dos temas vitales de la inteligencia artificial: ¿Qué es inteligencia? ¿Cuán inteligentemente podemos lograr que se comporte un programa? Cuando en el foco de tales preguntas situamos formas restrictas de actividad humana "inteligente", como pueden ser los juegos de tablero, las cuestiones parecen diluirse en una maraña de detalles técnicos.

La búsqueda de una teoría de la inteligencia continúa. Hay especialistas en inteligencia artificial que han sugerido que la construcción de una máquina pensante puede ser algo así como la construcción de una máquina que vuele. Tal vez sea posible una especie de "teoría de sustentación intelodinámica". Para volar no es preciso construir pájaros mecánicos; los aeroplanos lo consiguen perfectamente. ¿Llegaremos algún día a ver inteloplanos?

Taller y laboratorio

No todos los sonidos que percibimos de la campana los produce su tañido

Jearl Walker

Hay campanas que tañen melodiosamente; otras simplemente suenan. ¿Qué factores determinan el timbre de una campana y las frecuencias que emite? Por raro que parezca, la nota que percibe un oyente acaso no la haya producido el instrumento. Este mes vamos a tratar de la acústica de campanas en conexión con algunos experimentos ideados por G. Theodore Wood, colega mío en la Universidad estatal de Cleveland. Aunque nos centramos en una campana de barco, también examinamos varias campanillas que nos prestó Katherine Marshall, de Cleveland.

Nos hemos apoyado en tres trabajos anteriores. En el siglo XIX Lord Rayleigh examinó las ocho campanas de su iglesia parroquial de Terling, sentando así las bases para estudios posteriores. Mas cercanos en el tiempo, Stephen David Kelby y Robin Paul Middleton, siendo estudiantes de la Universidad de Birmingham, experimentaron en torno a las campanillas de mano. El origen de la nota ilusoria lo ha investigado Arthur H. Renade, de la Universidad de Case Western Reserve.

La esencia de los sonidos musicales, cualquiera que sea su naturaleza, hay que buscarla en la resonancia acústica. Cuando el badajo, u otro objeto, golpea la campana, ésta vibra. Lo que entonces oímos son las ondas sonoras generadas por esa vibración. Pero de las vibraciones sólo algunas generan ondas sonoras de intensidad suficiente para que nuestro oído las capte. Ese conjunto particular de vibraciones recibe el nombre de modos de resonancia.

El estudio de la resonancia acústica acostumbra a acometerse con ayuda de un sencillo sistema constituido por una cuerda tensa entre dos soportes paralelos. Cuando se pulsa esa cuerda, aparecen en ella ondas que corren desde el punto pulsado hacia los soportes, se reflejan en éstos y regresan. Para simplificar supondremos que las ondas son senoidales como las de la figura 2. Característica de cada una de estas ondas es una longitud, que se define como la distancia a lo largo de la cuerda necesaria para que la forma de onda se repita. La determina, además, la frecuencia, o número de veces por segundo (expresado en hertz) que una cresta pasa por un punto de la cuerda.

Supongamos que, a lo largo de la cuerda, se envían dos ondas iguales en sentidos opuestos. Tras llegar a los soportes, se reflejan y se cruzan entre sí, manteniendo sus amplitudes iniciales. (Pasaré por alto la pérdida de energía que supone la tracción que ejercen sobre la cuerda y el batido de aire.) En cada instante la forma de una cuerda vibrante la establece la interferencia de las ondas en dicho momento. Por ejemplo, si las ondas están en fase, la cuerda adquiere una conformación senoidal. Entonces, donde las ondas presentan crestas, en la cuerda habrá crestas de una altura doble; donde las ondas presenten valles, en la cuerda habrá valles de una profundidad doble. De esta interferencia se dice que es constructiva. En otros momentos, las crestas de una de las ondas coincidirán con los valles de la otra y la cuerda estará lisa porque a toda tracción hacia arriba la contrarresta una tracción hacia abajo. De esta interferencia se dice que es destructiva. En los instantes intermedios, la forma de la onda la establece un grado de interferencia intermedio.

Controlando la frecuencia generada por la vibración inicial de la cuerda es posible controlar los tipos de ondas que se envía a lo largo de la misma. Para casi todas las variedades de frecuencias, la interferencia de las ondas deja a la cuerda prácticamente sin vibración. Mas para un conjunto de frecuencias particular, las frecuencias de resonancia, la interferencia origina en la cuerda una figura repetitiva que bate el aire con energía suficiente para que llegue a nuestros oídos.

Al puntear la cuerda, se generan simultáneamente muchísimas ondas; la mayoría de éstas, al tener una frecuencia inadecuada, no dan por resultado una figura repetitiva y no se oyen. Pero las pocas que poseen una frecuencia de resonancia obligan a la cuerda a vibrar enérgica y repetidamente.

La configuración de resonancia más sencilla, llamada fundamental o primer armónico, resulta siempre de un punteo. Los extremos de la cuerda no vibran porque están sujetos y el punto que vibra más es el centro. Los puntos de la cuerda que no presentan vibración se llaman nodos, y vientres aquéllos donde la vibración es máxima. De aquí que la configuración fundamental posea un vientre en el centro y un nodo en cada extremo. Para crear esa configuración las ondas deben tener una longitud doble que la cuerda. Entonces, a causa de la interferencia, el centro de la cuerda varía suavemente entre una cresta elevada, una forma lisa y un valle hondo. De este modo se bate enérgicamente el aire y se emiten ondas sonoras de la misma frecuencia que las ondas en la cuerda.

Con otras configuraciones de interferencia resultan sonidos de mayor frecuencia. La configuración más sencilla siguiente, o segundo armónico, se forma si la longitud de las ondas es igual a la longitud de la cuerda. Posee tres nodos (en los extremos y en el centro) y dos vientres. En este caso, aunque las ondas viajen por la cuerda, en el centro se interfieren siempre destructivamente y, por tanto, entre ambos vientres se alternan las interferencias destructivas y constructivas. La frecuencia del sonido que genera la cuerda es la misma que las ondas que hay en ella, la cual es doble que la fundamental.

Así, en la cuerda podemos descubrir más resonancias considerando longitudes de onda más cortas (y frecuencias más altas). Los valores de estas frecuencias se ajustan a la secuencia matemáticamente ordenada conocida por serie armónica: cada frecuencia es un múltiplo entero de la fundamental. Por ejemplo, el tercer armónico (tres vientres y cuatro nodos) tiene una frecuencia triple que la fundamental. Y el cuarto armónico (cuatro vientres y cinco nodos) posee una frecuencia cuádruple que la fundamental. Al pulsar una cuerda, se excitan la fundamental y algunos armónicos superiores porque ese punteo genera en la cuerda ondas de las longitudes de onda adecuadas. Genera asimismo ondas de longitudes de onda inadecuadas, las cuales no logran mover la cuerda de una manera signifi-

cativa; por cuya razón, nuestros oídos no la perciben.

Habitualmente sólo los armónicos más bajos son lo bastante intensos para ser oídos; ahora bien, dependerá en parte de dónde se puntee la cuerda para saber cuáles se excitarán. Supongamos, por ejemplo, que pulsamos en el centro. Seguro que se excita entonces la frecuencia fundamental: en ese punto tiene un vientre. Sin embargo, el segundo armónico no se excitará porque exige un nodo exactamente donde forzamos la vibración al puntear. Y estarán también ausentes todos los armónicos que requieran un nodo en el centro. Los demás armónicos se excitarán, unos (como el fundamental) fuertemente y otros débilmente.

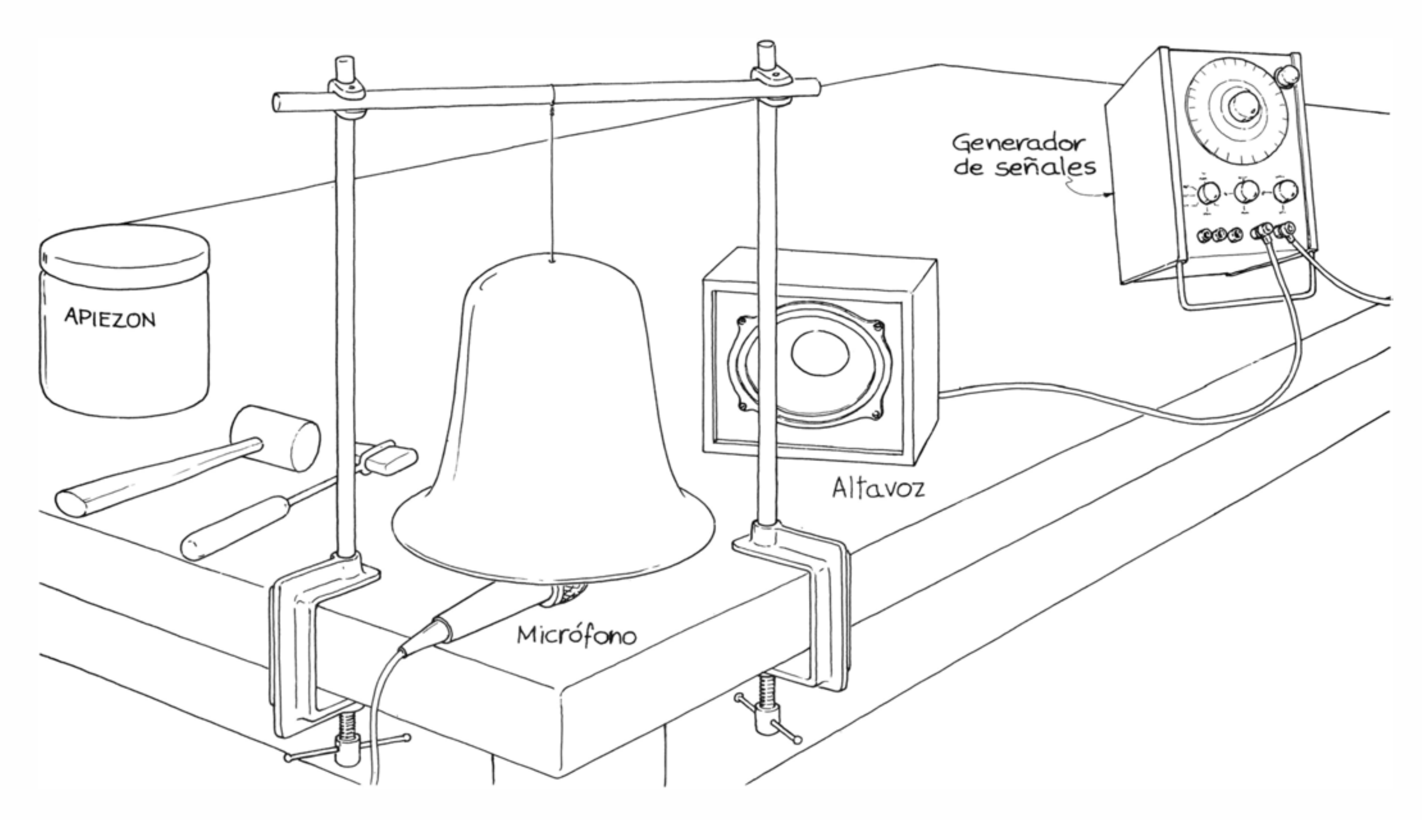
Este modelo de cuerda vibrante al que me he referido es una idealización. En las cuerdas reales las frecuencias de resonancia superiores no son múltiplos exactamente enteros de la frecuencia fundamental. El término armónico se reserva a las frecuencias que encajan exactamente en la secuencia. Para describir las resonancias que no se adaptan a ésta se emplea el término "parcial". Por tanto, cuando se puntea una cuerda se excitan el fundamental y varios parciales. Parte de la sonoridad de un instrumento de cuerda puede depender de la cuantía en que los parciales difieren de los armónicos ideales.

El repicar de una campana es similar a la pulsación de una cuerda tensa. Se crean ondas vibratorias que recorren el instrumento interfiriéndose entre sí. Las longitudes de onda de la mayoría de tales ondas no son adecuadas para crear una configuración repetitiva e intensa de vibraciones. Pero las pocas dotadas de una longitud de onda resonante interfieren y hacen que en la campana se generen configuraciones vibratorias repetitivas. La campana, al batir el aire, genera ondas sonoras de las mismas frecuencias que las ondas vibratorias.

Esas frecuencias de resonancia no forman una serie armónica y, por tanto, son parciales. Pese a ello, según Benade y otros, un observador podría pensar que la campana ha emitido una serie armónica. Ante una serie puramente armónica producida por un generador de sonido, un oyente percibirá únicamente la frecuencia fundamental. De hecho, el cerebro examina los armónicos, selecciona el fundamental y lo reconoce. Esta asignación es fácil cuando se presenta un conjunto de armónicos completo, los cinco primeros por ejemplo. Supongamos, empero, que falte uno de éstos. La asignación sigue efectuándose, aunque el armónico ausente sea el propio fundamental. El cerebro se las arregla para comparar los sonidos, discernir que son parte de una serie armónica y, más aún, percibir el tono fundamental.

Supongamos un oyente ante unos sonidos que no formen una serie armónica. En este caso puede percibirlos de varias maneras. Si el cerebro deduce que se ajustan aproximadamente a una serie armónica, forzará al oyente a percibir el fundamental aunque éste no se cuente entre los sonidos. Otra posibilidad es que el cerebro utilice la mayoría de ellos para adaptarlos lo mejor que pueda a una serie armónica y deje aparte uno o más. Entonces, el oyente puede verse obligado a percibir simultáneamente el fundamental ausente y los parciales que hayan quedado fuera del mejor ajuste. Esta estimación de la frecuencia fundamental percibida plantea un problema. Corrientemente se comete un error de una octava. Por ejemplo, el do central de un piano (do-4) tiene una frecuencia de 261,6 hertz, pero un oyente quizá lo interprete situado una octava más arriba, o sea, como un do-5, cuya frecuencia es doble que la del do central.

Este análisis e interpretación son válidos para los sonidos emitidos por una campana. Los sonidos no armónicos que genera ésta puede forzarlos el cerebro a encajar lo mejor posible en una serie armónica. En la realidad, podría percibirse el tono fundamental de ésta aunque no hubiera tal en el sonido. Lo



1. Montaje para estudiar las resonancias de una campana de barco

que es más, la asignación de una frecuencia al fundamental percibido podría adolecer de un error de una octava (o sea, del doble). Si algunos de los parciales no se encajan en el mejor ajuste, el oyente puede oírlos acompañando al fundamental.

Las campanas afinadas se diseñan de modo que generen las configuraciones de frecuencias y vibraciones representadas en la figura 3. La frecuencia más baja (la persistente) se llama nota sorda. La frecuencia más alta siguiente, llamada la fundamental o principal, es doble que la nota sorda. (Para evitar confusiones con la resonancia en cuerdas a esta frecuencia la llamaré principal y no fundamental.) Los varios parciales que siguen están referidos al principal. La tercera nota es una tercera menor de la principal, es decir, su frecuencia es 1,2 veces la de ésta. La nota siguiente es una quinta de la principal (factor 1,5). La nota llamada octava tiene una frecuencia doble que la principal. La denominada tercera aguda la tiene dos veces y media. En la ilustración se presentan asimismo otros dos parciales de una campana afinada.

Cuando se tañe una campana afinada, se excitan la nota sorda y algunos de los demás parciales. A cada uno de éstos hay asociada una configuración determinada de nodos y vientres de vibración. Las líneas de puntos nodales (sin vibración) voy a llamarlas meridianos, si recorren la campana de arriba abajo, y paralelos si la circundan. La nota sorda tiene dos meridianos nodales a lo largo de los cuales no vibra la campana. (Esta configuración se indica en la ilustración mediante un círculo que representa una vista en planta de la campana.) Equidistante entre ambas líneas nodales se encuentran los vientres de la vibración. Como al golpear la campana se obliga a ésta a vibrar en el punto del impacto, una de las líneas ventrales de la nota sorda debe pasar por ese punto. Las ondas de vibración que recorren la campana establecen el resto de la configuración. Por ejemplo, a 45 grados de longitud a cada lado del impacto aparecen líneas nodales.

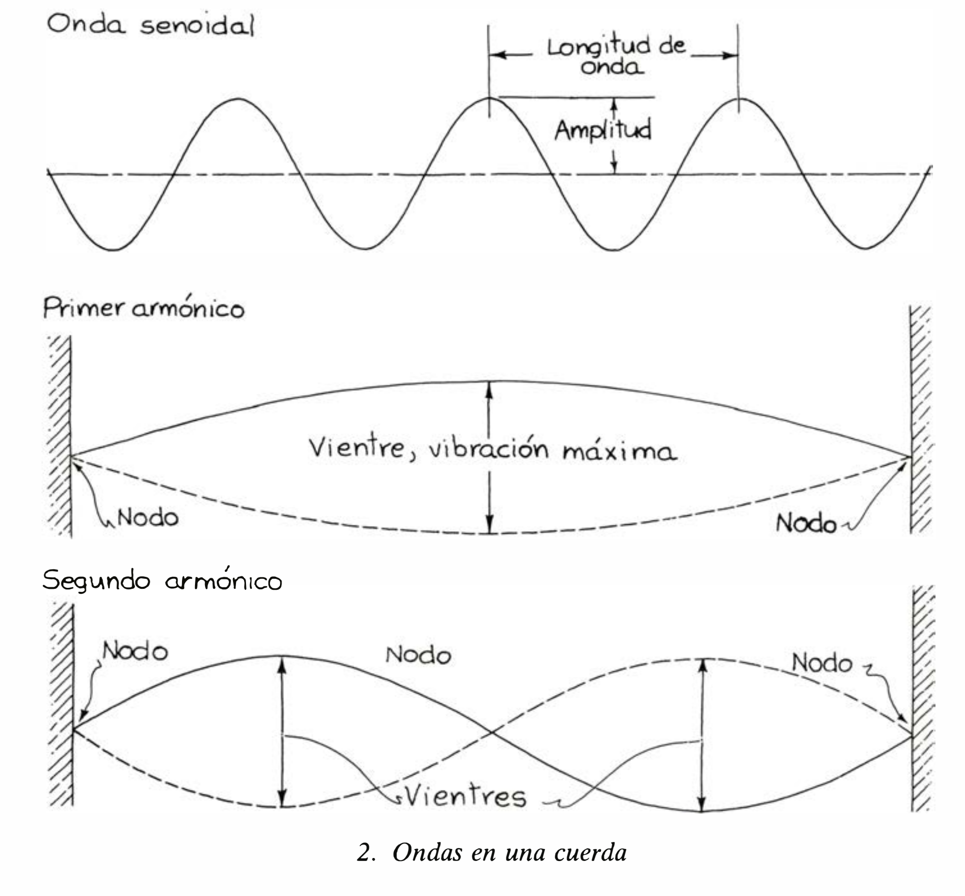
La configuración vibratoria de la frecuencia principal es similar, salvo por un paralelo nodal. Así, cuando se excita esta frecuencia, aparecen dos líneas nodales que recorren la campana de arriba abajo y, además, otra que la rodea. La posición de ésta depende de la distribución de masa del instrumento. En la figura 3 se muestra también las configuraciones vibratorias de los otros parciales. En todos los casos la ubicación de los paralelos nodales la he hecho sólo aproximadamente.

Estas configuraciones pueden designarse de acuerdo con el número de meridianos y paralelos nodales que contengan. Por ejemplo, la correspondiente a la nota sorda recibe el nombre de modo (2,0) e indica la existencia de dos meridianos nodales y la ausencia de paralelos. La designación tanto de la tercera menor como de la quinta es (3,1). Aunque estas dos configuraciones tienen los mismos tipos de líneas nodales, difieren en sus paralelos nodales y en las frecuencias de las ondas responsables de las configuraciones. Ninguna campana puede vibrar en el modo (1,0), ni en ningún modo carente de meridianos nodales, pues ello requeriría que oscilase el tamaño de la panza; las campanas son excesivamente robustas para permitir tales alargamientos y contracciones del telar.

Las relaciones entre frecuencias que les he expuesto son válidas sólo para las campanas afinadas. Estos instrumentos son musicalmente agradables merced a tales relaciones. Cuando un oyente escucha los sonidos de una campana, puede encajarlos en una serie armónica compuesta de la frecuencia principal, la octava y las parciales que sean el triple y el cuádruple de la principal. Entonces, el oyente percibirá probablemente la principal cual si fuera la fundamental de la serie. La nota sorda y las demás frecuencias que hayan quedado fuera de la serie las puede percibir separadas de la principal.

Otra posibilidad es que el oyente opte inconscientemente por una serie armónica de la nota sorda y los parciales múltiplos enteros de esa frecuencia. Entonces la campana parecería repicar en la nota sorda y también, quizás, en la tercera menor (que queda fuera de la serie). Si se pidiera al oyente que estimase la frecuencia, podría responder con la de la nota sorda o caer en el error de la octava y dar la frecuencia principal. Aunque lo que se oye y la frecuencia asignada al sonido son producto de un proceso inconsciente, resulta difícil predecir el resultado.

Con una campana no afinada, la predicción es aún más difícil. Wood y yo hemos examinado una campana de barco evidentemente desafinada con una panza de 25 centímetros de diámetro. Se trataba de un instrumento de bronce suspendido de un travesaño horizontal sujeto, a su vez, a unos soportes de mesa. Le habíamos quitado el badajo. Para hacerla sonar la golpeamos con martillos dotados de cabeza de plástico duro, caucho duro y acero. El golpe más blando dado con la cabeza de caucho generó principalmente las



2. Ondas en una cuerda

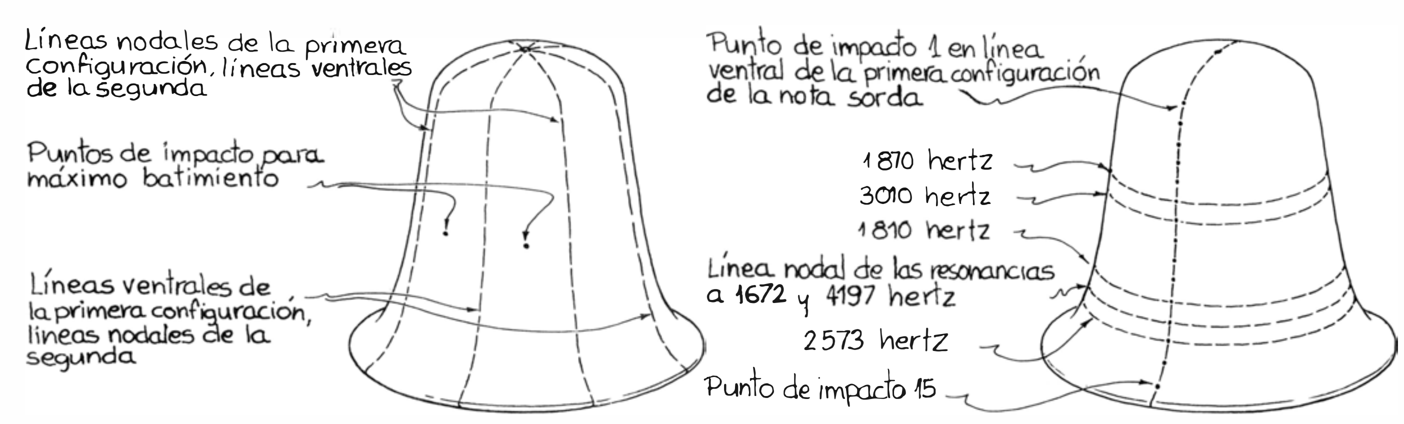
Meridiano nodal
Línea latitudinal nodal
Sorda (2,0)
Fundamental o principal (2,1)
Tercera menor (3,1)
Quinta (3,1)
0,5 f principal
f principal
1,2 f principal
1,5 f principal
Octava (4,1)
Tercera aguda (4,1)
Doceava (5,1)
Octava aguda (6,1)
2 f principal
2,5 f principal
3 f principal
4 f principal

3. Líneas nodales en una campana

frecuencias más bajas; el más fuerte, con la cabeza de acero, generaba además las frecuencias más altas. Bajo la panza instalamos un micrófono conectado a un ordenador programado por Wood para separar las frecuencias del sonido y desplegarlas en una pantalla con sus amplitudes relativas. El ordenador podía producir también una gráfica de las frecuencias. El análisis lo limitamos a frecuencias inferiores a 5000 hertz.

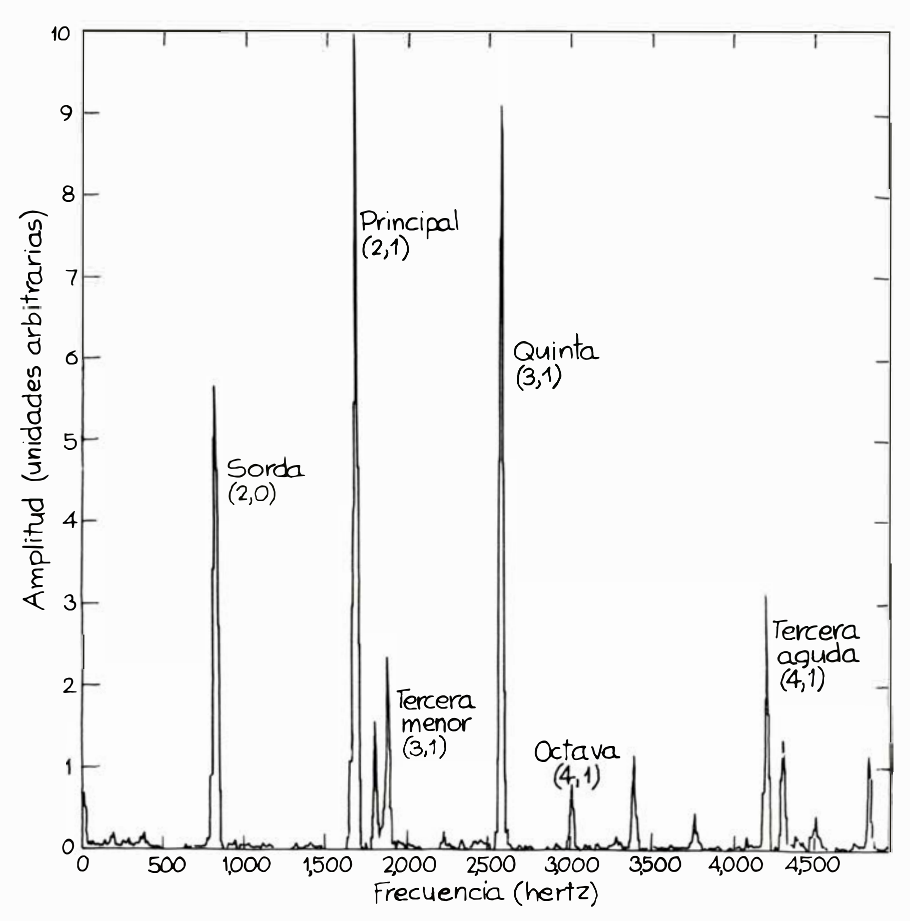
Un golpe aproximadamente en el centro de la campana producía una nota sorda con un batimiento marcado, o trino. El ordenador reveló que la nota sorda se dividía en dos frecuencias de 811 y 819,9 hertz. Lo que nosotros oíamos eran esas frecuencias y la interferencia de una con la otra. Periódicamente los dos sonidos llegaban a nuestros oídos de modo que se reforzaban entre ellos. En el ínterin llegaban contrarrestándose (o casi). Así oíamos las frecuencias verdaderas y, además, un sonido extra (la media de ambas notas sordas) cuya intensidad variaba con una rapidez igual a la diferencia entre las frecuencias verdaderas.

Estos batimientos en el comporta-



4. Configuraciones del tono sordo en una campana asimétrica

5. Paralelos nodales de una campana



6. Frecuencias de resonancia en el punto 8

miento de las campanas los había explicado Lord Rayleigh en función de la distribución de masa en torno al cuerpo del instrumento. Supongamos que la distribución de masa sea perfectamente simétrica. En ese caso, al golpear la campana en cualquier punto se excitará la nota sorda. En el punto de impacto habrá automáticamente un vientre y el resto de la configuración lo determinará la posición de ese punto. Golpeando en otro punto resultará la misma configuración, aunque desplazada de modo que el punto de impacto siga siendo un vientre. E independientemente de la posición de éste, para la nota sorda se generará la misma frecuencia.

Si la distribución de masa es asimétrica, se rompe la simetría de la configuración de vibraciones. Entonces podrán existir dos configuraciones para la nota sorda, una de ellas desplazaba 45 grados en latitud con respecto a la otra. De aquí que las líneas nodales de una configuración coincida con las líneas ventrales de la otra. Estas configuraciones vibran con frecuencias distintas. Y si éstas son suficientemente próximas, pueden producir batimientos una contra otra cuando se excitan las dos configuraciones.

En una campana asimétrica las líneas nodales y ventrales permanecen fijas. Por ello, al golpear una campana en un punto puede que únicamente se excite una configuración y que, al golpear en otro, se excite la otra configuración. Y aun habrá puntos en los que podrían excitarse ambas configuraciones. Si se excita sólo una, se emitirá su frecuencia únicamente. Cuando se exciten las dos por igual, se emitirán ambas con la misma intensidad y los batimientos resultantes de su interferencia se notarán muchísimo.

Wood y yo nos propusimos determinar las líneas nodales y ventrales correspondientes a la configuración de cada nota sorda. A lo largo de un paralelo situado hacia el centro de la mitad superior de la campana tanteamos punto a punto. En uno de ellos sólo oímos una nota sorda aislada, sin batimientos. Adscribimos este punto a la línea ventral de la primera nota sorda. Como se encontraba en la línea nodal de la segunda configuración, sólo se había excitado la primera. Según el ordenador, la frecuencia era de 819,9 hertz.

Conforme avanzamos a lo largo del paralelo aparecieron batimientos, lo que nos indicaba que se excitaban ambas configuraciones. Golpeando más adelante todavía nos encontramos con menos batimiento y, al final, de nuevo un tono puro de la nota sorda, esta vez con una frecuencia de 811 hertz. En este punto se excitaba sólo la segunda configuración, pues el mismo se encontraba en una línea ventral de esa segunda configuración y en una nodal de la primera. Proseguimos así circunvalando la campana y señalando los puntos de tono puro y batimiento máximo. De ese modo comprobamos que las dos configuraciones de las notas sordas se hallaban desplazadas 45 grados una con respecto a la otra.

Wood y yo razonamos entonces que podríamos alterar las frecuencias de las notas sordas añadiendo masa a la campana. Para ello adherimos pasta de sellar Apiezon (la arcilla de modelar serviría igualmente) al telar del instrumento en un punto perteneciente a una línea ventral de la segunda configuración. Imaginábamos que si golpeábamos para excitar sólo la segunda configuración, la masa añadida retrasaría la vibración y decrecería su frecuencia. Y así fue, la frecuencia bajó de 811 a 808,4 hertz. Por otra parte, como la masa la habíamos puesto en una línea nodal de la primera configuración, no debería alterar la frecuencia de ésta. En efecto, al golpear en el punto que había de excitar únicamente la primera configuración, la frecuencia resultó ser aproximadamente la misma.

Retiramos la pasta de sellar e investigamos, empezando por arriba, a lo largo de un meridiano nodal coincidente con una línea ventral de la primera configuración. Desde arriba marcamos 15 puntos separados unos trece milímetros, con el propósito de buscar los meridianos nodales de los parciales superiores. Nos preguntábamos especialmente si la secuencia de frecuencias y configuraciones vibratorias se ordenarían del mismo modo que en una campana afinada.

A medida que golpeábamos la campana, costado abajo, la frecuencia de resonancia de 1672 hertz permaneció intensa, salvo en el duodécimo punto, donde, evidentemente, se presentaba un paralelo nodal. La frecuencia de resonancia de 1810 hertz presentó una ancha franja nodal meridiana que abarcaba regiones comprendidas entre los puntos séptimo y duodécimo, desapareciendo del todo en el undécimo. La resonancia de 1870 hertz presentó una franja nodal meridiana extensa centrada en el punto sexto. La resonancia a 2573 hertz resultó fuerte en los puntos más altos, para cobrar su máxima intensidad en el punto décimo y casi de-

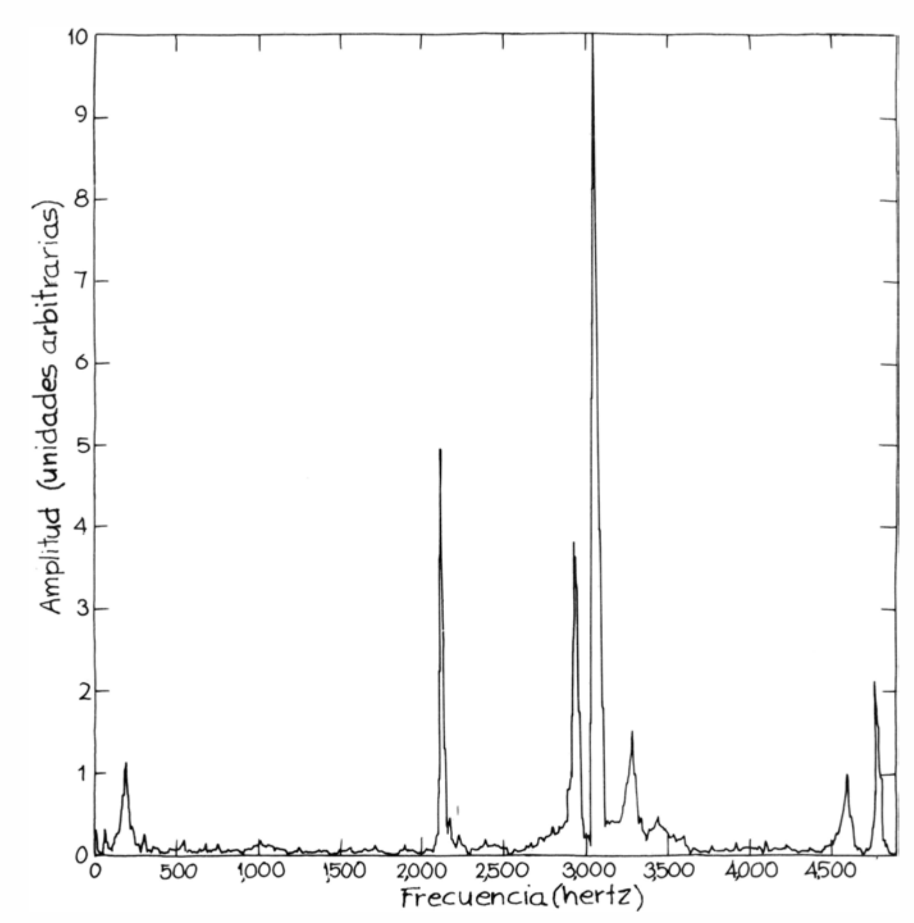
saparecer, después, junto al telar de la campana. La resonancia a 3010 hertz mostró una zona nodal meridiana estrecha en el punto séptimo. La resonancia de 4197 hertz se desvanecía por completo en el punto duodécimo.

Con estos datos intentamos relacionar las frecuencias de resonancia con las configuraciones vibratorias. Las notas sordas estaban ya establecidas en 811 y 820 hertz. Por dos razones nos imaginamos que la frecuencia principal era de 1672 hertz. Esa frecuencia venía a doblar la frecuencia de la nota sorda, lo que sería cierto en el caso de una campana afinada. Por otra parte, además, esa frecuencia tiene un nodo paralelo que pasa por el punto décimo, posición muy adecuada para la principal.

Costaba más identificar las otras frecuencias de resonancia; ninguna de ellas caía en la secuencia matemática de una campana afinada. Para identificar esta configuración hay dos condiciones. Primero, la frecuencia de resonancia debe estar a menos de dos o tres centenares de hertz de los valores predichos (entonados) respecto a la principal. Segundo, la configuración debe poseer un nodo meridiano adecuado. Con estas condiciones las configuraciones correspondientes a las resonancias de 1870, 2573, 3010 y 4197 hertz se asemejan a las configuraciones llamadas, respectivamente, tercera menor, quinta, octava y tercera aguda.

Pueden descubrirse más pistas golpeando alrededor de un meridiano y contando el número de nodos y vientres para cada frecuencia de resonancia. La asimetría en la masa de la campana debe dividir cada frecuencia de resonancia, pero el poder separador de nuestro dispositivo de ordenador resultó evidentemente insuficiente para definir las escisiones. Aun con todo, la asimetría fija las distribuciones de los nodos de cada resonancia, por lo que pueden buscarse las configuraciones a lo largo de un meridiano al igual que lo hicimos para la nota sorda. No investigamos esos datos adicionales y nos dimos por satisfechos comprobando que la campana estaba esencialmente desafinada.

Wood intentó identificar de dos maneras la nota de conjunto del instrumento. En un ensayo localizó la nota de la campana con una escala musical generada eléctricamente. La mejor igualación la encontró ligeramente por encima del sol-5. (La nota tónica del piano está en 784 hertz). Luego probó con un generador de señales. Aquí la mejor igualación la consiguió a los 819 hertz. Evidentemente, lo que él (y yo) oíamos procedente de la campana estaba muy cerca de la nota sorda. Acaso las resonancias a 820, 1672, 2573, 3010 y 4197 hertz se ajustan lo bastante ceñidamente a una serie armónica para hacernos caer en esa identificación. Si tal es el caso, la fundamental de la serie estaría próxima a la frecuencia de la nota sorda. Sin embargo, las frecuencias más altas podrían desaparecer con tal rapidez que sólo pueda oírse y reconocerse la nota sorda.



7. Frecuencias de resonancia de una campana de cristal

Wood y yo examinamos asimismo las frecuencias (hasta los 5000 hertz) emitidas por cuatro de las campanillas de Marshall. No imaginamos que ninguna de ellas estuviera afinada, aunque sus notas sordas se distinguían perfectamente. Una de ellas, de vidrio plomizo soplado procedente de Portugal, sonaba muy agradablemente pero con un asombroso número de frecuencias. La segunda era un cencerro suizo muy poco melodioso. La tercera consistía en un instrumento de plata de ley con una gran cantidad de frecuencias. La última era una campanilla de oraciones budista de frecuencias altas. De ésta pudimos determinar la frecuencia de la nota sorda, pero no logramos identificar las frecuencias más altas con ninguna configuración vibratoria.

A quien le interese estudiar la resonancia de las campanas le sugiero que emplee un ordenador personal para analizar el espectro de frecuencias. Muchas marcas de ordenadores venden programas para ello. Un procedimiento de abordar el tema más dificultoso es el que siguen los fabricantes de campanas. Estos buscan las frecuencias de resonancia localizando al oído los batimientos entre el sonido del instrumento y un tono que ellos producen, bien por canto o a través de un instrumento afinado.

La tarea se simplifica barriendo lentamente una gama de frecuencias con un generador de señales. Entonces se presta atención al sonido procedente de un altavoz conectado al generador, a la vez que se repica la campana. Cuando la frecuencia del generador se acerca a una de la campana se oirán batimientos. Entonces podrán eliminarse algunas frecuencias de resonancia golpeando la campana a lo largo de sus paralelos nodales. Si la distribución de la masa es asimétrica, podrán eliminarse también algunas frecuencias golpeando a lo largo de meridianos nodales. De este modo podrá desentrañarse qué frecuencias y qué configuraciones vibratorias caracterizan al instrumento.

Libros

Estado estable, medidas, descubrimientos geográficos, erupciones volcánicas y tiempo y el primer acelerador

José M. Sánchez-Ron, L. Villena, J. Ventura, R. Margalef y L. Alonso

Cosmology and Astrophysics. *Essays in Honor of Thomas Gold*, dirigido por Yervant Terzian y Elizabeth M. Bilson. Cornell University Press; Ithaca, 1982. Este libro reúne una colección de artículos presentados en un simposio celebrado entre el 9 y el 11 de octubre de 1980 en la Universidad de Cornell, para festejar el 60 cumpleaños de Thomas Gold.

A los no iniciados en la física moderna, el nombre de Thomas Gold no les dirá nada, salvo, si acaso, y aun así de forma vaga, en relación con la célebre cosmología del estado estable. Basta, no obstante, echar una ojeada a la impresionante lista de publicaciones científicas de Gold, que cierra este volumen y que incluye 191 entradas, para comprender la amplitud e importancia de sus trabajos. Fue Gold (1968), por ejemplo, quien convenció a la mayoría de los astrónomos de que las emisiones regulares detectadas por los radiotelescopios de Cambridge en el otoño de 1967 debíanse a una estrella de neutrones. La observación, poco después, de un pulsar en la Nebulosa del Cangrejo confirmó esta hipótesis. Gold, además de haber desarrollado una amplísima labor en astrofísica y cosmología relativista, ha abordado –y resuelto– problemas de biofísica de la audición humana, fotografía estereoscópica, observaciones químicas en satélites artificiales, fuentes terrestres de carbón y de gases, terremotos, estructura geológica profunda de la Tierra, petróleos, etcétera.

Con *Cosmology and Astrophysics* se ha pretendido homenajearle seleccionando once artículos de temas en cuyo estudio el propio Gold ha intervenido. ¿Cuál es el valor objetivo de este tipo de obras? Puede tratarse, en primer lugar, de un volumen en el que se ofrecen panorámicas bastante completas de una serie de temas. Son los codiciados *reviews*, que tan útil función cumplen en una era científica tan especializada y competitiva como la nuestra. Ciertamente, este libro no es de este tipo. Está, en segundo lugar, el volumen constituido por artículos de investigación más o menos autocontenidos, artículos que se diferencian de los que normalmente aparecen en las revistas especializadas en el hecho de que se permiten algunas licencias no toleradas en éstas. *Physics as Natural Philosophy. Essays in Honor of Laszlo Tisza* (The MIT Press, 1982) podría ser un buen ejemplo de este tipo de obras. Nuestro *Cosmology and Astrophysics* no puede considerarse dentro de semejante categoría. ¿Qué se puede decir, entonces, acerca de esta obra? Sin duda, se puede decir que es una *miscelánea* desigual en estructura y en posibles audiencias.

Una primera manifestación de desigualdad aparece en la extensión que merecen los diferentes temas: de las 129 páginas dedicadas a los once artículos, 50 se destinan a discutir *una* de las contribuciones de Gold: la cosmología del estado estable. ¿Qué motivos pueden existir para semejante elección? Probablemente el que la cosmología del estado estable fuese –*sea* todavía para algunos– un intento, heterodoxo, radical y que atrajo considerable atención y polémicas, de abordar un problema fundamental para las ciencias: la naturaleza del universo. Además, la idea básica de esta cosmología se debe al propio Gold.

El tratamiento de la cosmología del estado estable en *Cosmology and Astrophysics* gira en torno a un extenso artículo (publicado con anterioridad en forma de librito: *Steady-State Cosmology Re-visited* [University College Cardiff Press, 1980]) de Fred Hoyle, todavía hoy, junto al en un tiempo estudiante suyo, Jayant Narlikar, un ardiente defensor de este modelo cosmológico. El artículo de Hoyle, junto con las dos breves notas de Hermann Bondi y Gold, el famoso trío que en los años 1947-48 lanzó desde Cambridge aquellas atrevidas ideas, constituyen, principalmente, una interesante y necesaria aportación a la *historia* de la física. Son, además, las suyas las contribuciones históricas más deseadas por el historiador profesional; esto es, aquellas en las que se aprecian contradicciones, puntos de vista, recuerdos y pretensiones diferentes e incluso una cierta tensión entre Hoyle, por un lado, y Bondi y Gold por el otro. En lo que se refiere a las intenciones científicas de la contribución de Hoyle (que no son sino defender su teoría frente a cosmologías como la de Robertson-Walker, hoy aceptada generalmente) hay que señalar que, aunque algunos de los puntos que Hoyle señala son interesantes –al autor de *La nube negra* se le puede acusar de todo menos de falta de imaginación–, sus opiniones son claramente minoritarias entre la comunidad científica, y que las opiniones en contra, sustentadas por un amplio *corpus* de pruebas, teóricas, experimentales y heurísticas, no encuentran cabida en este volumen.

Con anterioridad me he referido a este libro como misceláneo. El resto de los artículos que lo componen justifican plenamente este calificativo. Así, el cuarto trabajo –puente hacia otros en que se tocan temas más actuales y técnicos– es una deliciosa exposición de Bondi, reconstruyendo de forma elemental la teoría de la relatividad general de Einstein. Como ocurre con los buenos vinos, es probable que el de paladar intelectual no educado en la estructura de la relatividad general no aprecie, aunque sí entienda, la belleza y simplicidad del enfoque de Bondi. Nótese, sin embargo, y de nuevo aparece aquí otro aspecto misceláneo, la no novedad: ésta es una vieja cuerda tañida por el propio Bondi, aunque tal vez sea ésta la ocasión en donde su presentación resulta más detallada.

Los siete restantes artículos contenidos en *Cosmology and Astrophysics* tienen interés especialmente para el científico o estudiante con deseos de trascender su área de conocimientos. Se trata de contribuciones breves, excesivamente breves algunas, que abordan problemas de punta tanto en astrofísica de altas energías como en el estudio del sistema solar. De nuevo se encontrará aquí el lector experimentado con algu-

nas "baladas ya cantadas". Así ocurre, por ejemplo, con la discusión a cargo de Dennis Sciama de las explosiones de agujeros negros. El constante esfuerzo de Sciama por divulgar los descubrimientos de Jacob Bekenstein y Stephen Hawing, que él considera como los hallazgos más importantes en la física de las últimas décadas y guías heurísticas esenciales para futuros desarrollos fundamentales, es meritorio. Pero en cuanto al alcance y significado que éste da a tales avances, digamos que aunque plausibles son, probablemente, demasiado aventurados.

Otra canción ya conocida, aunque no por ello menos importante, es la de Joseph Taylor. Afortunadamente, su conciso repaso de las mediciones experimentales obtenidas hasta 1982 de los púlsares PSR 0820 + 02 y PSR 0655 + 64, púlsares que forman parte de un sistema binario (dos cuerpos celestes), viene seguido por un todavía más breve artículo de Saul Teukolsky en donde se explican algunas razones por las que dichas observaciones son importantes: su conexión con la relatividad general, y en concreto con la existencia o no de ondas gravitacionales. Es de lamentar, no obstante, que Teukolsky apenas mencione las implicaciones que las observaciones de Taylor tienen para uno de los problemas todavía abiertos en la teoría de Einstein, relacionado además de manera muy estrecha con la cuestión de las ondas gravitacionales: el problema del movimiento.

Cuestiones relativas a las posibilidades de "ver" estrellas de neutrones, resonancias, anillos y cometas en el sistema solar, así como la magnetosfera de Júpiter, completan, en artículos de Helfand, Goldreich, Singer y Stanley, y Desser, este conciso, desigual, pero desde luego interesante homenaje a Thomas Gold. (J. M. S. R.)

Repetición Sexta sobre las Medidas, por Elio Antonio de Nebrija. Ediciones Universidad de Salamanca, 1981. La experiencia es madre de la ciencia, según dice el antiguo adagio. Y realmente la ciencia moderna, basada en lo poco que podemos observar de la naturaleza que nos rodea, nace de los conocimientos empíricos acumulados por la experiencia, contrastados después en los experimentos montados para repetir, con una cierta simplificación y rigor, los mismos fenómenos naturales. Pero, además, los avances científicos suelen estar provocados por la necesidad creciente que el hombre siente por explicar, predecir y utilizar los fenómenos naturales. Una de esas primeras necesidades, en cuanto hubo comunidades sedentarias fue "inventar" y cuantificar el tiempo y el espacio, así como establecer un sistema lógico para el trueque de alimentos u otros bienes recogidos o cultivados. Todo ello dentro del marco de la revolución neolítica que introduce, junto con el sedentarismo, la agricultura y la ganadería, el urbanismo y la jerarquía (de los viejos) el fuego y la cerámica, la conservación de excedentes y el trueque.

La primera actividad del hombre será comparar el exterior consigo mismo. Medirá las longitudes en brazas, codos, palmos, dedos; el tiempo, en latidos de su corazón; la capacidad, en cargas; el peso, comparándolo con sus brazos extendidos en forma de balanza. Estas medidas antropométricas, cuyo valor cambia de una en otra comunidad, serán recogidas por los sacerdotes que así se erigen en árbitros y ganan prestigio y poder. Se fabrican dispositivos: reglas, vasijas y otros que tipifican las unidades y se guardan en el templo, pero ni aún así se consigue que haya un solo codo o una sola arroba.

Es interesante hacer notar que existe la tendencia no sólo a derivar de la unidad de longitud las de superficie y de volumen, sino de establecer la unidad de peso coherentemente con la de capacidad, eligiendo para aquélla el peso de una cierta materia contenida en la unidad de capacidad. Gracias a la arqueología se conocen los sistemas numéricos y metrológicos de sumerios, elamitas y babilonios de una parte y de egipcios de otra, además de los hebreos, sobre cuya metrología nos habla frecuentemente el Antiguo Testamento. En todos ellos se ha encontrado una lógica relación entre la unidad de longitud (en algunos casos diferente si se medía sobre una superficie o en altura) y las correspondientes de área y de volumen. Igualmente se trata de relacionar con esta última las de capacidad y de peso.

Más claro es aún el intento de los gobernantes hispano-musulmanes. Se trataba de que el contenido en grano de una unidad de capacidad fuera la unidad de peso. El codo "rassisi" estaba grabado en las mezquitas de Córdoba y Granada. La unidad de área tenía 40 × 40 codos. La unidad de capacidad, el "gadah" o cántara, tenía un volumen de 0,25 codos cúbicos. El "quintar" de 100 libras era el peso, en cebada, de un pie cúbico, usándose normalmente la "al-rab" (que significa un cuarto) o arroba con un peso de 25 libras o "ritl". La arroba de trigo pesaba de 30 a 32 libras. Finalmente, el tiempo se medía por el peso de la arena que fluía del "arenario".

La eclosión de la ciencia renacentista, rompiendo las teorías monolíticas de Aristóteles y dejando que cada rama del saber siguiera su curso lógico, representa un enorme cambio en toda Europa, pero no en España, donde, por un lado, ya se ha realizado una síntesis entre las obras clásicas, las orientales y los comentarios y creaciones árabes y judíos y, por otro, al ser expulsados judíos y moriscos, los pocos y mediocres matemáticos españoles no tienen el acicate del intercambio de ideas. Además, la "filosofía natural" al uso está aún de espaldas a la experiencia. Nuestros científicos, en general, no osan descender a los talleres artesanales y "mancharse las manos". Mucho menos preocuparse por un tema tan poco intelectual como pesas y medidas. Hoy resulta evidente el diferente talante entre el físico (y cualquiera de los otros científicos) y el filósofo. Aquellos proceden de fuera adentro, hacen experimentos, miden ciertos observables (magnitudes físicas) y elaboran modelos (expresados matemáticamente) que no buscan la verdad, sino que pretenden explicar aquello que se ha observado, predecir lo que se observará y poner al servicio de la humanidad sus consecuencias. Por el contrario, el filósofo procede de dentro afuera, elaborando teorías que, aplicadas a cuanto le rodea, le permitirán atisbar la verdad global. Hace silogismos en lugar de experimentos.

Cuando, tras la expulsión de judíos y moriscos, los españoles constituyen su propia sociedad, hay muy buenos artesanos de cuyos talleres se podrían sacar pequeños o grandes logros científicos, pero los filósofos, incluidos los matemáticos y los incipientes físicos, no se "ensucian las manos". Así ocurre que los adelantos experimentales de la época, nacidos casi siempre de estos talleres artesanales, son realizados y recogidos por teólogos como Domingo de Soto, canonistas como Daza de Valdés, médicos como Francisco Salvá y, sobre todo, por ingenieros militares, o marinos, como Alonso de Santa Cruz, Pedro Navarro, Diego de Alava, etcétera. Este impulso provendrá de los nuevos centros de enseñanza: la Casa de Contratación de Sevilla creada en 1503 y la Academia de Matemáticas de Madrid, fundada en 1582 y absorbida en 1624 por el Colegio Imperial. Habría que añadir escuelas más especializadas como la Academia Real Militar de Bruselas fundada en 1672 y, un siglo después, el Instituto y Observatorio de la Marina, establecido en Cádiz en 1754

y trasladado luego a San Fernando, en 1798.

En este clima de comienzos del siglo XVI hay dos salmantinos que destacan por su interés en la medida y en la experimentación. Se trata del judío Abrahan Zacuto que, siguiendo una brillante tradición hispano-musulmana, desarrolla un astrolabio de cobre para determinar la altura del sol, simplificado y adaptado a usos náuticos. Como resultado de sus medidas redacta, en hebreo, después en árabe y latín, sus famosas tablas astronómicas. Ambas aportaciones serán utilizadas en los viajes a América y a otros apartados lugares. Coetáneo con Zacuto es Antonio de Nebrija, más conocido como filósofo que como científico que también redactó obras de astronomía y midió el grado de meridiano terrestre entre Mérida y Salamanca, obteniendo 625 millas.

Con motivo del quinto centenario del primer libro impreso en Salamanca, esta universidad ha reeditado una lección magistral de Nebrija y su traducción castellana. Costas Rodríguez ha hecho, además de la esmerada traducción, una cabal introducción explicando el sentido de la "repetición" o "relección" que, como complemento a las lecciones ordinarias, debían impartir los catedráticos de Salamanca sobre un tema relacionado con la materia del curso anterior. Nebrija dedicó tres de estas disertaciones a las medidas, los pesos y los números formando un pequeño tratado de metrología, pronto reimpreso, que trataba de ordenar y aclarar el cúmulo de pesas y medidas mencionados por los antiguos autores. El librito que comentamos contiene sólo la "repetición" sobre las medidas dictadas en 1510.

Aunque Nebrija estuviera centrado en los estudios filológicos, su ordenación exhaustiva así como sus comentarios de las medidas antiguas permite adentrarse en este abigarrado bosque y establecer las cadenas de unidades en cada cultura: hebrea, griega, latina y, parcialmente, egipcia y persa, así como las interrrelaciones entre estas series. Nebrija insiste en la necesidad de un único patrón de partida y demuestra no tener prejuicios abordando él mismo el camino experimental, en el estadio de Mérida y en la llamada "Vía de la Plata", hasta deducir el auténtico valor del pie, que Nebrija dejaría fijado en la entrada de la Biblioteca Salmantina. Consecuentemente con su dedicación, Nebrija aporta un cúmulo enorme de autoridades en las que ha basado su "relección", desde tratados puramente técnicos como los de Vitruvio, Frontino, etc., hasta la Biblia, que Nebrija cita profusamente.

Como ya dijo Cotarelo en sus comentarios sobre Nebrija, hay que agradecerle su clarividencia de unificar las unidades de medida y de establecer una relación simple entre las unidades de longitud y volumen y entre las de capacidad y peso.

La traducción de Jenaro Cortas puede calificarse de "castiza" ya que, usando el diccionario latino-español del propio Nebrija, refleja los nombres castellanos de época para las distintas unidades, con su grafía.

El opúsculo termina con el relato del experimento que Arquímedes realizó para descubrir el famoso fraude cometido en la corona de oro encargada por Hierón de Siracusa a un artífice deshonesto. Nebrija introduce quizás este relato pensando que también la metrología puede contribuir a la moral. (L. V.)

DESCRIPCIÓN DE LAS COSTAS DE CALIFORNIA, por Fray Iñigo Abbad y Lasierra. Edición y estudio de Sylvia Lyn Hilton. C.S.I.C. Instituto "Gonzálo Fernández de Oviedo"; Madrid, 1981. Dentro de los múltiples proyectos investigadores que se están programando con motivo del V Centenario del Descubrimiento de América, nos encontramos ya con que algunos empiezan a cristalizar. La *Descripción de las costas de California* del benedictino Fray Iñigo Abbad y Lasierra es una obra inconclusa que se encontraba inédita y duplicada en la Biblioteca del Palacio Real y en la del Ministerio de Asuntos Exteriores de Madrid. Su autor escribió también una *Historia de Puerto Rico* (1789) –de la que se han hecho varias ediciones– y una *Relación de la Florida*, que fue publicada por Serrano y Sanz en sus *Documentos inéditos de Florida y Luisiana* en este siglo.

El estudio preliminar de Hilton consta de cinco partes. En la primera analiza la expansión hispana, por lo que ella denomina "El límite noroccidental del Imperio Hispánico, 1513-1784)". Es decir, desde el descubrimiento del Pacífico por Balboa en 1513 hasta 1784. En la segunda estudia la personalidad de Fray Iñigo y la obra que comentamos; nos ofrece en la tercera una lista de las fuentes citadas por el clérigo aragonés. Presenta en la cuarta una breve advertencia sobre la transcripción de la *Descripción*, para agregar luego el texto completo de ésta y cerrar la serie con un índice de los topónimos que aparecen en ella.

Como colofón de su trabajo publica cuatro apéndices documentales: epístolas de Fray Iñigo al Rey e índice de las "provincias e islas de la América, cuyas descripciones están formadas"; noticias sobre los descubrimientos rusos (1761-1763), algunas de ellas editadas antes; noticias sobre Kamchatka y un tratado secreto entre Rusia e Inglaterra, así como de descubrimientos rusos entre 1772 y 1775. Se aportan tres mapas de las costas del Pacífico septentrional. (J. V. R.)

VOLCANO WEATHER. THE STORY OF 1816, THE YEAR WITHOUT A SUMMER, por Henry y Elizabeth Stommel. Seven Seas Press, Newport, Rhode Island, 1983. Stommel es uno de los cultivadores más eminentes de las ciencias del mar; sus contribuciones a la oceanografía física –y más indirectamente a la planctología– han dejado una huella creadora y perdurable en estas disciplinas. Este libro, preparado con la colaboración de su esposa, se aparta un tanto del tema principal de su actividad. Viene a ser uno de estos entretenimientos que algunos grandes científicos producen después de su jubilación y que, no infrecuentemente, son de gran calidad por introducir puntos de vista distintos de los habituales. En este caso, tratan de un tema que recientemente saltó a las páginas de periódicos y revistas, con motivo de las erupciones de los volcanes de Santa Elena y Chichón. El texto es relativamente breve, y una serie de grabados antiguos –algunos con poca conexión con lo narrado, pero todos interesantes– y de notas permiten extenderlo hasta la dimensión de un libro.

El tema principal es el carácter extraordinario que tuvo el año 1816, de temperaturas anormalmente bajas, de forma que se malograron muchas cosechas, con la secuela natural de hambres y revueltas. La información y las anécdotas conciernen principalmente a Nueva Inglaterra; pero perturbaciones análogas se reflejaron en Europa, como se atestigua con referencia a Suiza, Francia e Irlanda. En la misma respuesta compleja se sitúa la epidemia de cólera que afligió varios continentes en la década de los 30 y que, al parecer, tuvo su origen en la India, de donde se propagó a partir de la misma fatídica fecha de 1816. Las malas cosechas y el clima anormal, bien documentado por distintas series de registros termométricos de la época, se relacionan con la erupción del volcán de Tambora, en la isla indonesia de Sumbawa, que se estima expulsó un volumen de materiales próximo a unos 100 kilómetros cúbicos.

Por el volumen del material introducido en la atmósfera, se calcula que esta erupción fue la más importante de las ocurridas en el curso de los diez últimos milenios. La erupción del Krakatoa en 1883 no expulsó más que unos 10 kilómetros cúbicos, es decir, la décima parte de la erupción del Tambora; la explosión de Santorini, en 1470 antes de nuestra era, se estima que fue aproximadamente del mismo calibre que la del Krakatoa; en cuanto a la erupción del Santa Elena, en 1980, no dejó escapar más de un kilómetro cúbico de materiales sólidos.

Se supone que el mecanismo a través del cual las erupciones influyen sobre el clima es aumentando la opacidad de la atmósfera y limitando, por tanto, la llegada de la radiación electromagnética a nivel del suelo y de la baja atmósfera. Sin embargo, el mecanismo a través del cual esta disminución de la radiación se convierte en un clima distinto sobre extensiones continentales muy grandes no está todavía aclarado. Todo esto está aquí explicado de manera muy amena, tejido en información anecdótica e histórica. Los aspectos técnicos no tratan mucho más allá de la temperatura; el libro es de divulgación y, por supuesto, no se extiende en el área de la mecánica de atmósferas y océanos.

Es innecesario insistir en la actualidad del difícil libro; por dos razones. Existe la preocupación de que el aumento de la concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera produzca un aumento de la temperatura, por el llamado efecto de invernadero; es bueno recordar que la introducción de materiales pulverulentos en la atmósfera tiene un efecto inverso, de enfriamiento, como queda directamente probado a través del estudio de las secuelas de las grandes erupciones volcánicas. Ahora la pregunta es: ¿cómo se combinan ambos efectos, el de aumento de temperatura por el CO_2 y el de disminución de temperatura por el polvo? Otro tema de interés es la atenuación de la luz y, por tanto, de la función asimiladora de vegetales, por la opacidad del polvo en la atmósfera. En este aspecto, el estudio de las erupciones puede ser muy importante en relación con dos acontecimientos, uno de ellos en el pasado, otro, si Dios no lo remedia, en el futuro. La transición de la era Secundaria (Cretácico) a la Terciaria (Paleoceno) que se manifiesta en cambios sustanciales de la biosfera se atribuye, bien a grandes erupciones, bien al impacto de un planetoide, pero en todo caso a la suspensión en la atmósfera de una enorme cantidad de materiales absorbentes de la luz. ¿Qué cantidad de materiales hacen falta para producir determinados efectos y cuál debe ser su persistencia? Se especula ahora, como es natural, que una de las consecuencias de una desventurada guerra nuclear sería la disminución de la producción primaria y posible daño de los productos primarios por el entenebrecimiento de la atmósfera. (R. M.)

COCKCROFT AND THE ATOM, por Guy Hartcup y T. E. Allibone. Adam Hilger; Bristol/Heyden, Philadelphia, 1984. El recientemente desaparecido P. L. Kapitza glosaba así el interesado juicio de la novela *Los caballeros las prefieren rubias*, "El amor es algo hermoso, pero una pulsera de oro dura toda la vida": "La teoría es algo hermoso pero un buen experimento es para siempre". Quizá sería este el homenaje mejor que pudiera rendirle a su amigo y colega de años fecundos John Douglas Cockcroft, premio Nobel de física 1951 compartido con E. T. S. Walton, por su trabajo pionero en la transmutación de los núcleos atómicos en los aceleradores de partículas.

La primera desintegración de un átomo, el de nitrógeno, se remonta a 1919. La obtuvo Ernest Rutherford al bombardearlo con partículas alfa (nucleos de helio) de una fuente radiactiva (bismuto). A lo largo de los cuatro años siguientes Rutherford y James Chadwick logran desintegrar algunos elementos más y va asentándose la idea según la cual los núcleos de los átomos más pesados estarían compuestos de hidrógeno y helio junto a partículas sin carga eléctrica, los neutrones, cuya prueba directa se obtuvo en 1932. Esa fue, en síntesis, la hipótesis de la tan celebrada conferencia Bakerian ante la Royal Society de 1920.

Cockcroft llega al Cavendish en 1924 para realizar el doctorado bajo la dirección de Chadwick. Había escogido por tema de grado el comportamiento de los átomos metálicos depositados en una superficie *in vacuo*. Investigación que compartía ayudando a la construcción de un equipo para generar campos magnéticos intensos. Se recibió en 1928. Centró luego su afán en la aceleración de partículas, que conduciría a las desintegraciones nucleares.

Todo neoingresado en el Cavendish pasaba un tiempo largo de iniciación en el manejo de las técnicas de laboratorio. Consistía el aprendizaje en el dominio del uso de radiofuentes, técnicas de vacío y medición de muy bajas presiones, entre otras cosas. Por falta de espacio y medios, los trabajos se realizaban por parejas. (Escasez que llegaba a todas partes. Cuando nuestro Blas Cabrera marchó al Politécnico de Zurich para trabajar con Pierre Weiss se conformó con asentar su laboratorio en el descansillo de la escalera.) Tenían que construir su propio electroscopio y medir con él la ionización producida por los rayos alfa, beta y gamma emitidos por la materia radiactiva. Sus rangos (energías) variaban según el medio a atravesar y podían discernirse con filtros sencillos. "Cuánto aprendiamos con un aparato tan elemental."

La historia de la construcción del primer acelerador se recrea con pasión y se lee con interés. Se ofrece el fundamento físico de la probabilidad de la desintegración artificial por protones (memorándum de Cockcroft a Rutherford, diciembre de 1928), y asistimos al despliegue, rectificación, construcción de las piezas integrantes. "Me encantaba aquello, escribe Walton, porque yo disfrutaba con el trabajo manual. Tenía un torno en mi casa, y no pocas herramientas. Quiero decir que mi destreza manual estaba más experimentada que la del promedio de estudiantes... Cockcroft, por su lado, era único a la hora de ubicar los aparatos necesarios para nuestro menester..." Y luego, los primeros éxitos enviados a *Nature* (13 de febrero de 1932): la energía máxima de los protones producida hasta la fecha ha sido de 710 kiloelectronvolt. Y el 14 de abril, el gran éxito: habían obtenido partículas alfa producidas artificialmente. La tarde del 16 de abril, en casa de Rutherford, Cockcroft y Walton preparan la comunicación que había de salir en el *Nature* del 30 de abril: "el isótopo de litio de masa 7 captura un protón y el núcleo resultante, de masa 8, se rompe en dos partículas alfa, cada una de las cuales está dotada de masa 4 y cada una de las cuales porta una energía de unos ocho millones de electronvolt".

El acelerador de Cockcroft-Walton, con los experimentos que ambos realizaron con él abrieron un nuevo campo: la espectroscopía nuclear. El libro de Hartcup y Allibone, este último antiguo colaborador suyo, nos habla también de su temple humano, de su patriotismo. Revive la atmósfera espléndida y cotidiana de los años fundacionales de la física y tecnología nuclear: la de la generación del "cocodrilo". Ese saurio que repta hoy por las paredes de Cavendish en honor de quien así fue apodado por Kapitza, Rutherford. Cuenta la leyenda rusa que el cocodrilo nunca retrocede. Los pioneros, tampoco. (L. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

RECONSTRUCCION DEL AMBIENTE A TRAVES DE LOS GRANOS DE POLEN

CONTRIBUIÇAO À PALINOLOGÍA DOS CERRADOS. M. L. Salgado-Labouriau. Editado por la Academia Brasileira de Ciencias; Brasil, 1973.

AN ILLUSTRATED GUIDE TO POLLEN ANALYSIS. P. D. Moore y J. A. Webb. Hodder & Stroughton; Londres, 1978.

THE EQUATORIAL RAIN FOREST: A GEOLOGICAL HISTORY. J. Flenley. Butterworths; Sidney, 1979.

EL MEDIO AMBIENTE PARAMO. M. L. Salgado-Labouriau. Ediciones del Centro de Estudios Avanzados del IVIC; Venezuela, 1979.

LATE QUATERNARY ENVIRONMENTAL HISTORY OF LAKE VALENCIA, VENEZUELA. J. Platt Bradbury, B. Leyden, M. Salgado-Labouriau, W. M. Lewis, Jr., C. Schubert, M. W. Binford, D. G. Frey, D. R. Whitead y F. H. Weibezahn en *Science*, vol. 214, n.º 4527, págs. 1299-1305; 18 de diciembre de 1981.

VOLCANES SUBMARINOS

BIRTH OF AN OCEAN: THE CREST OF THE EAST PACIFIC RISE. Jean Francheteau, Thierry Juteau, David Needham y Claude Rangin. Centre National pour l'Exploitation des Océans; 1980.

ABUNDANCES, DISTRIBUTION AND SIZE OF VOLCANOES IN THE PACIFIC OCEAN AND IMPLICATIONS FOR THE ORIGIN OF NON-HOTSPOT VOLCANOES. Rodey Batiza en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 60, n.º 2, págs. 195-206; septiembre, 1982.

THE DISTRIBUTION OF INTRAPLATE VOLCANISM IN THE PACIFIC OCEAN BASIN: A SPECTRAL APPROACH. N. M. Ribe y A. B. Watts en *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 71, n.º 2, págs. 333-362; noviembre, 1982.

INMUNOTOXINAS

ANTIBODY CARRIERS OF DRUGS AND TOXINS IN TUMOR THERAPY. *Immunological Reviews*, vol. 62; 1982.

CHIMERIC TOXINS. Sjur Olsnes y Alexander Pihl en *Pharmacology and Therapeutics*, vol. 15, n.º 3, págs. 355-381, 1982.

NUCLEOTIDE SEQUENCE OF THE STRUCTURAL GENE FOR DIPHTERIA TOXIN CARRIED BY CORYNEBACTERIOPHAGE β. Lawrence Greenfield, Michael J. Bjorn, Glenn Horn, Darlene Fong, Gregory A. Buck, R. John Collier y Donald A. Kaplan en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 80, n.º 22, págs. 6853-6857; noviembre, 1983.

FORMA Y FUNCION EN LA LOCOMOCION DE LOS PECES

MATHEMATICAL BIOFLUID DYNAMICS. M. J. Lighthill. Society for Industrial and Applied Mathematics; 1975.

A COMPARATIVE MECHANOPHYSIOLOGICAL STUDY OF FISH LOCOMOTION WITH IMPLICATIONS FOR TUNA-LIKE SWIMMING MODE. T. Y. Wu y G. T. Yates en *The Physiological Ecology of the Tunas*, dirigido por Gary D. Sharp y Andrew E. Dizon. Academic Press, 1978.

FISH BIOMECHANICS. Paul W. Webb y Daniel Weihs. Praeger Publishers, 1983.

ESTRELLAS SIMBIOTICAS

SYMBIOTIC STARS—A BINARY MODEL WITH SUPER-CRITICAL ACCRETION. G. T. Bath en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, volumen 178, n.º 1, págs. 203-217; enero, 1977.

IUE OBSERVATIONS OF SYMBIOTIC STARS. M. Hack en *Advances in Ultraviolet Astronomy—Four Years of IUE Research*, dirigido por Y. Kondo, J. M. Mead y R. D. Chapman, NASA Conference Proceedings n.º 2238; 1982.

THE NATURE OF SYMBIOTIC STARS: PROCEEDINGS OF THE IAU COLLOQUIUM N.º 70, HELD AT THE OBSERVATOIRE DE HAUTE PROVENCE. Dirigido por Michael Friedjung y Roberto Viotti. D. Reidel, Publishing Co., 1982.

THE PECULIAR VARIABLE STAR R AQUARII AND ITS JET. Minas Kafatos y Andrew G. Michalitsianos en *Nature*, vol. 298, n.º 5874, págs. 540-542; 5 de agosto de 1982.

TRATAMIENTO DE TEXTOS PLURILINGÜES

WRITING SYSTEMS OF THE WORLD. Akira Nakanishi. Charles E. Tuttle, 1980.

A HISTORICAL STUDY OF TYPEWRITERS AND TYPING METHODS: FROM THE POSITION OF PLANNING JAPANESE PARALELS. Hisao Yamada en *Journal of Information Processing*, volumen 2, número 4, páginas 175-202; febrero, 1980.

MATEMATICA DE LAS VARIEDADES TRIDIMENSIONALES

THREE-DIMENSIONAL MANIFOLDS, KLEINAN GROUPS AND HYPERBOLIC GEOMETRY. William P. Thurston en *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*, vol. 6, n.º 3, páginas 357-381; mayo, 1982.

RAICES MEDIEVALES DE LA REVOLUCION INDUSTRIAL

LE MOULIN A EAU: UNE REVOLUTION TECHNIQUE MEDIEVALE. B. Gille en *Techniques et civilisations*, vol. 3, páginas 1-15; 1954.

MAN AND WATER: A HISTORY OF HYDRO-TECHNOLOGY. Norman Smith. Peter Davies, Ltd., 1976.

THE MEDIEVAL MACHINE: THE INDUSTRIAL REVOLUTION OF THE MIDDLE AGES. Jean Gimpel. Holt, Rinehart and Winston, 1976.

STRONGER THAN A HUNDRED MEN: A HISTORY OF THE VERTICAL WATER WHEEL. Terry S. Reynolds. The Johns Hopkins University Press, 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

EXPERIMENTS IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SMALL COMPUTERS. John Krutch. Howard W. Sams & Co., Inc., 1981.

COMPUTER GAMESMANSHIP. David Levy. Century Publishing, 1983.

TALLER Y LABORATORIO

VIBRATIONS OF PLATES. John William Strutt, Baron Rayleigh, en *The Theory of Sound: Vol. 1*. Dover Publications, Inc., 1945.

THE VIBRATIONS OF HAND BELLS, S. D. Kelby and R. P. Middleton en *Physics Education*, vol. 15, págs. 320-323; 1980.